

Revue *Le débat*

Vers une nouvelle biologie ?

dossier



Novembre-décembre 2008

Dossier "Vers une nouvelle biologie ?"
publié dans la revue *Le débat* n°152,
novembre-décembre 2008.

Vers une nouvelle biologie ?

La théorie de l'évolution est en plein mouvement. À un bout, elle est en passe d'être révisée dans sa conception d'ensemble ; à l'autre bout, ce sont les frontières du vivant et les mécanismes primitifs de la vie qui s'éclairent sous de nouveaux jours.

Jerry A. Fodor fait le point sur les données qui poussent à remettre en question les idées de sélection naturelle et d'adaptation, telles qu'elles étaient classiquement reçues dans le cadre darwinien. **Freeman J. Dyson** souligne la portée révolutionnaire des travaux de **Carl R. Woese** sur les transferts d'information génétique au sein des populations microbiennes (dont nous donnons un bilan synthétique dû à Carl R. Woese lui-même, en compagnie de **Nigel Goldenfeld**). Ils bouleversent en particulier la conception des débuts de l'histoire de l'évolution des formes vivantes. Chose remarquable, ces résultats convergent avec ceux obtenus par Jean-Marie Lehn dans le domaine de la chimie supramoléculaire. **Evelyn Fox Keller** dégage les perspectives ouvertes par l'unification qui se dessine de la sorte, en comblant, dit-elle, « le fossé conceptuel entre le vivant et le non-vivant ». **Jean-Marie Lehn** expose le renouvellement de la conception de la matière qui se dessine à partir de l'étude des phénomènes d'auto-organisation sélective au niveau moléculaire.

Le Débat

Nota bene

Ce dossier illustre la médiocrité de la pensée scientifique et philosophique en biologie.

Le scientisme satisfait qui s'en dégage reste encore malheureusement de mise dans ces milieux.

C'est pourquoi nous avons traduit
le commentaire de Wendell Berry (p. 48)
sur l'article de Freeman Dyson.

B. L.

Dans ces articles, il est fait référence à un article de

Carl Richard Woese,

Une nouvelle biologie pour un nouveau siècle,
juin 2004.

Dont on trouvera la traduction ici :

< <https://archive.org/details/woese-biologie> >

Une édition réalisée faute de mieux !

Jerry A. Fodor

Pourquoi les porcs n'ont pas d'ailes



Les Maîtres chanteurs de Nuremberg est, selon les critères wagnériens, un opéra assez joyeux. L'action roule sur le matériau de base de la comédie, les intrigues matrimoniales : le héros et l'héroïne finissent bel et bien par se marier, et l'on peut au moins supposer que, dès lors, ils sont heureux. Il y a des contre-courants, et des courants de fond, qui rendent le livret des *Maîtres chanteurs* subtil, d'une manière inhabituelle pour un livret d'opéra. Mais, pour une fois, on n'entrevoit pas Nietzsche et personne ne meurt ; on est plus proche du *Barbier de Séville* que du *Ring*. Cependant, dans la première scène de l'acte III, l'oncle Hans Sachs, dont les interventions bienveillantes facilitent les entreprises des deux amants, livre dans une aria d'amères réflexions sur la condition humaine. Cela arrive comme un choc :

« Chimère ! Chimère !
Partout la chimère !
Où que je regarde, [...]
les gens se tourmentent et se maltraitent
dans une vaine et folle colère
jusqu'à verser le sang.
Nul n'en reçoit salaire
ni remerciements,
contraint à la fuite,

il s' imagine qu'il chasse.
Il n'entend pas son propre cri de douleur,
lorsqu'il déchire sa propre chair,
il croit se donner du plaisir. »

Ainsi, la question « quelle mouche a bien pu piquer Sachs ? » est un problème central pour les fans de Wagner, un problème auquel l'opéra n'apporte aucune solution (dans la scène 2 de l'acte III, Sachs se remet au travail, faisant ce qu'il faut pour que Walther retrouve son Eva, et réciproquement). Sachs n'est évidemment pas le premier à se demander pourquoi nous sommes si enclins à nous rendre nous-mêmes malheureux, et la question est toujours pertinente. Nous venons tout juste de voir la fin d'un siècle terrible, et il est tout à fait possible que le pis reste à venir. Pourquoi nous est-il si difficile d'être bons ? Pourquoi nous est-il si difficile d'être heureux ?

Une chose, du moins, est assez largement admise : on ne peut pas attendre un grand secours de la science. La science s'intéresse aux faits, et non pas aux normes ; elle pourrait nous dire comment nous sommes, mais elle ne peut pas nous dire ce qui ne va pas dans notre manière d'être. Il ne pourrait pas y avoir de science de la condition humaine. Ainsi, on admet communément, depuis Hume, que les jugements de valeur sont irréductibles aux jugements de faits. Cependant, cet axiome humien a été dernièrement en butte à des attaques, et un nouveau consensus est en train d'émerger : Sachs avait raison d'être inquiet; nous sommes tous un peu fous, et ce pour des raisons que nous révèle, prétend-on, la théorie darwinienne de l'évolution. Ce qui déraile chez nous, c'est que l'esprit que nous avons n'a pas évolué pour se débrouiller dans le monde où nous vivons. Notre type d'esprit a été sélectionné pour résoudre des types de problèmes auxquels étaient confrontés nos ancêtres chasseurs-cueilleurs il y a à peu près trente mille ans, des problèmes qui se posent à de petites populations qui tentent de subsister et de se reproduire dans un écosystème où les ressources sont rares. Mais on peut penser que ce type d'esprit ne fonctionne pas très bien en ce troisième millénaire à Lower Manhattan,

où il y a une population foisonnante, un Starbucks ¹ à chaque pâté de maisons, mais où pour survivre il faut éviter de se faire écraser, trouver un courtier en placements qui soit fiable, et ne pas avoir plus d'enfants qu'on ne peut en envoyer à l'université. Ce n'est pas que nos problèmes soient plus ardues que ceux de nos ancêtres : qu'est-ce qui permettrait de le mesurer, après tout ? C'est plutôt que l'équipement mental que nous avons hérité d'eux ne convient pas à ce que nous essayons de faire avec. Pas étonnant alors qu'il nous rende cinglés.

Cette idée que notre esprit s'est formé par des processus d'adaptation évolutive et que l'environnement auquel il est adapté n'est pas celui que nous habitons aujourd'hui a été reçue ces derniers temps d'une manière extraordinairement favorable dans la presse. Le darwinisme a toujours fait de la bonne copie car il semblait plus proche de nos préoccupations que les autres branches de la science, comme la botanique, l'astronomie ou l'hydrodynamique. Mais si cette nouvelle conception a quelque chose de vrai, il en est encore plus proche que nous ne l'avions cru. Ce qui agaçait le plus les opposants à Darwin, c'était son discours sur la phylogénie de notre espèce. Ils ne pouvaient apprécier que nous ne soyons qu'une branche parmi d'autres de l'arbre de l'évolution ; et ils appréciaient encore moins d'avoir des babouins parmi leurs relations de famille. L'histoire des combats qui s'ensuivirent est légendaire, mais cette dispute est désormais terminée. Hormis, peut-être, dans de lointains trous perdus du Middle West, le récit darwinien sur l'histoire de notre espèce est un terrain d'entente dans toutes les discussions civilisées, et il doit en être ainsi. Les preuves sont vraiment considérables.

Mais la théorie darwinienne de l'évolution comporte deux parties. L'une d'elles est le discours bien connu sur notre phylogénie ; l'autre est la théorie de la sélection naturelle, qui a pour ambition de caractériser le mécanisme, non seulement de la formation des espèces, mais aussi de tous les changements évolutifs survenant dans les propriétés innées des organismes. Selon la théorie de la sélection, le «phénotype» d'une créature (c'est-à-dire l'ensemble de ses caractères héréditaires, comprenant notamment ses traits psychologiques héréditaires) est une

¹ Importante chaîne de cafés. [NdT]

adaptation aux exigences de la situation écologique. On appelle adaptation le processus par lequel des variables environnementales sélectionnent, parmi les individus d'une population, ceux dont les propriétés hérissables sont les mieux adaptées pour la survie et la reproduction. Ainsi, la sélection environnementale pour l'adaptation est (peut-être avec quelques nuances) le processus par excellence qui élague l'arbre de l'évolution.

La plupart du temps, les deux composantes de la synthèse darwinienne sont évoquées en même temps ; mais il est important de voir que la phylogénie peut être vraie même si l'adaptationnisme ne l'est pas. En principe, au moins, il peut s'avérer que des babouins se trouvent effectivement dans notre arbre généalogique, mais que ce ne soit pas la sélection naturelle qui les y ait placés. C'est bien plus sur l'adaptationnisme que sur la phylogénie que repose le discours darwinien à propos de ce qui déraille chez nous. Notre problème, affirme-t-il, est que le type d'esprit que nous avons est un anachronisme ; il a été sélectionné par un environnement qui n'existe plus. En conséquence, si la théorie de la sélection naturelle se révélait fausse, cela saperait le fondement du diagnostic darwinien sur notre malaise. Si les phénotypes ne sont pas sélectionnés pour quoi que ce soit, alors, en particulier, il n'y a rien pour quoi ils soient sélectionnés. Cela s'applique entre autres aux phénotypes psychologiques.

Or, un nombre significatif de biologistes parfaitement raisonnables en viennent à penser que la théorie de la sélection naturelle ne peut plus être considérée comme admise. Jusqu'à présent, il s'agit principalement de signes précurseurs ; mais il n'est pas exclu qu'une révolution scientifique, rien de moins qu'une révision majeure de la théorie de l'évolution, se profile à l'horizon. À la différence du discours selon lequel notre esprit serait une adaptation anachronique, ce nouveau tournant ne semble pas avoir été largement perçu en dehors des cercles de spécialistes. La conséquence est pleine d'ironie : au moment où la théorie de la sélection naturelle est devenue une composante de la culture populaire, elle se trouve confrontée à ce qui pourrait être le défi le plus sérieux qui se soit présenté jusqu'ici. On sait que les darwinistes

prétendent que l'adaptationnisme est la meilleure idée que l'on ait jamais eue. Ce serait une bonne plaisanterie si la meilleure idée que l'on ait jamais eue se révélait fausse. L'histoire des sciences est remplie de ce genre de plaisanteries que la nature inflige à nos théories favorites.

•

Deux types de considérations menacent désormais la position centrale de la sélection naturelle au sein de la théorie de l'évolution; l'une est plus ou moins conceptuelle, l'autre plus ou moins empirique.

Aspect conceptuel. On peut penser qu'il y a une ambiguïté au cœur de la théorie de la sélection ; et les décrochements survenant le long de la ligne de faille qui en résulte menacent de faire écrouler toute la structure. Le problème est le suivant : on peut comprendre l'adaptationnisme comme l'idée selon laquelle l'environnement sélectionne des êtres vivants parce qu'ils sont adaptés; ou bien on peut l'interpréter comme l'idée selon laquelle ce sont des caractères qui sont sélectionnés parce qu'ils sont adaptés. Il semble que la théorie doive être lue des deux manières pour que son objectif soit rempli : d'une part, les forces de sélection doivent agir sur des êtres individuels, puisque ce sont ces êtres individuels qui vivent, luttent, se reproduisent et meurent. D'autre part, les forces de sélection doivent agir sur des caractères, puisque c'est l'évolution des phénotypes (des groupes de caractères héréditaires) que la théorie de la sélection se propose d'expliquer. Il n'est cependant pas évident que la théorie de la sélection puisse faire l'objet de ces deux lectures en même temps. Peut-être l'opinion consensuelle parmi les darwinistes est-elle que les phénotypes évoluent parce que des individus adaptés sont sélectionnés pour les caractères qui les rendent adaptés. Cette manière de présenter les choses lève l'ambiguïté, mais pour qu'elle soit viable, il faudrait que l'adaptationnisme puisse fournir la notion indispensable de « sélection pour quelque chose » ; et il apparaît, après réflexion, qu'il ne le peut peut-être pas. D'où la perplexité actuelle.

L'histoire peut raisonnablement reconnaître Stephen Jay Gould et Richard Lewontin comme les premiers à avoir repéré qu'il y avait peut-être un sérieux problème dans cette partie de la théorie. Leur article de

1979, “Les pendentifs de Saint-Marc et le paradigme panglossien : une critique du programme adaptationniste”, déclencha un débat sur les fondements de la théorie de la sélection, débat qui ne montre toujours pas de signes d’apaisement. Les pendentifs sont l’une des surfaces plus ou moins triangulaires qui se trouvent à la jointure des arcs soutenant une coupole. Ils sont souvent richement décorés; les peintres ont rivalisé d’imagination pour réaliser les dessins qui y sont placés. De fait (et c’est là le point principal de Gould et Lewontin), une observation superficielle pourrait faire croire que les pendentifs sont là parce qu’ils offrent une possibilité de décoration; un adaptationniste pourrait dire que c’est pour cela qu’ils ont été sélectionnés. Mais en réalité, selon Gould et Lewontin, ce serait mettre la charrue avant les bœufs. En fait, les pendentifs sont la conséquence indirecte d’une architecture d’arcs et de dômes; si l’on choisit ce type d’architecture, on a des pendentifs, qu’on le veuille ou non. Les arcs ont été sélectionnés parce qu’ils soutiennent les coupoles, les pendentifs ont juste suivi en cours de route.

Je suppose que Gould et Lewontin ont raison avec leur histoire architecturale, mais cela n’a pas vraiment d’importance pour ce qui nous occupe. Ce qui est important, c’est que si les pendentifs ont survécu et ont prospéré, cela n’implique absolument rien sur la raison pour laquelle ils ont été, le cas échéant, sélectionnés. En première approximation, on a des pendentifs si et seulement si on a une coupole soutenue par des arcs ; les deux choses sont, comme disent les logiciens, coextensives. Mais cela signifie-t-il dès lors que la sélection des arcs explique pourquoi il y a des pendentifs? Ou bien que la sélection des pendentifs explique pourquoi il y a des arcs ? Il semble, jusqu’ici, que les deux soient possibles; alors, qu’est-ce qui fait pencher la balance? C’est sûrement le fait que les coupoles et les arcs sont des objets fabriqués. Quelqu’un a effectivement conçu et choisi l’architecture de Saint-Marc ; et ce qu’il avait en tête lorsqu’il le fit, c’était que les arcs devaient soutenir la coupole, et non pas qu’ils devaient former des pendentifs à leurs jonctions. Ainsi, le problème est réglé: les pendentifs n’ont pas été sélectionnés pour quoi que ce soit; ils faisaient juste partie du *package*. Mais toute la question est de savoir si le même type de raisonnement peut s’appliquer à la sélection naturelle des caractères phénotypiques des organismes, là où il n’y a, à ce qu’on

suppose, aucun architecte pour prendre des décisions. Si les cathédrales n'étaient pas fabriquées mais qu'elles grandissaient dans la nature, l'explication évolutionniste exacte serait-elle qu'elles ont des arcs parce qu'elles ont été sélectionnées pour avoir des pendentifs ? Ou bien qu'elles ont des pendentifs parce qu'elles ont été sélectionnées pour avoir des arcs ? Ou bien ni l'un ni l'autre ? Ou encore les deux ?

C'est un lieu commun de dire que Darwin a élaboré la théorie de la sélection naturelle en observant ce que font les éleveurs lorsqu'ils choisissent les êtres vivants qu'ils encouragent à se reproduire. Cette lecture de Darwin n'est nullement originale. Darwin « raisonne d'après des exemples, et non par analogie », a écrit Adam Gopnik dans le *New Yorker* en octobre 2006.

« L'idée de départ de l'*Origine des espèces* n'est pas qu'un processus similaire a lieu dans les croisements d'animaux domestiques et dans la sélection naturelle ; c'est que c'est exactement la même chose, bien que, dans le second cas, de manière non intentionnelle et sur une période beaucoup plus longue. »

Il est vrai, bien sûr, que l'élevage, comme l'évolution, peut modifier les phénotypes au cours du temps, avec des effets consécutifs sur les relations phylogénétiques. Mais on voit immédiatement que les mécanismes à l'œuvre dans l'élevage et l'évolution pourraient difficilement être plus différents. Comment une décision calculée de sélectionner des animaux pour tel ou tel caractère pourrait-elle être « exactement la même chose » que la sélection aléatoire d'une population ? Gopnik ne le dit pas.

Le souci, dans le cas présent, est que l'explication de la sélection naturelle au moyen de la sélection dans l'élevage est particulièrement trompeuse et qu'elle a totalement fourvoyé Darwin. Étant donné que les éleveurs ont des intentions, ils sélectionnent des caractères pour des raisons bien précises : si on veut les connaître, il suffit de les leur demander. La sélection naturelle, au contraire, est aveugle ; elle agit sans préméditation. Cela met à rude épreuve l'analogie entre la sélection naturelle et l'élevage, peut-être jusqu'au point de rupture. Quelle est, dès

lors, l'interprétation visée lorsqu'on parle de « sélection naturelle»? La question est totalement ouverte depuis l'*Origine des espèces*.

Les réponses qui ont été proposées jusqu'à présent n'ont pas été très convaincantes. En particulier, bien qu'on n'en voie pas la fin dans les exposés courants sur l'adaptationnisme, c'est une très mauvaise idée que d'essayer de se tirer du pétrin en se permettant des métaphores anthropomorphiques. Par exemple, on ne peut pas prendre au pied de la lettre l'idée que les caractères sélectionnés sont ceux que mère Nature a à l'esprit lorsqu'elle opère la sélection; ni celle que ces traits sont ceux que des gènes égoïstes ont en tête lorsqu'ils entreprennent de se reproduire. Mère Nature n'existe évidemment pas, et les gènes n'ont pas de tels travers. Les métaphores sont des choses subtiles, on ne pourrait probablement pas faire de la science sans elles. Mais on suppose que c'est le genre de choses que l'on peut encaisser à la rigueur. En l'absence d'une interprétation rigoureuse et littérale de l'idée de « sélection de quelque chose », l'adaptationnisme s'empêtre dans ce truisme méthodologique.

Il y a là une délicieuse ironie. L'un des principaux objectifs du programme adaptationniste consiste à exclure des explications biologiques l'intentionnalité en général, et celle de Dieu en particulier. Je suis moi-même totalement d'accord avec cela; étant donné que je suis à peu près sûr que ni l'un ni l'autre n'existe, je ne vois pas de différence entre Dieu et mère Nature.

Peut-être est-il possible, après tout, d'expliquer que des variables environnementales aveugles sélectionnent des caractères phénotypiques. Autrement dit, peut-être est-il possible de s'en sortir en prétendant que les phénotypes sont comme des arcs, au sens où les deux sont des objets fabriqués. Le test critique consiste à savoir si notre théorie favorite peut faire la différence entre la sélection d'un caractère A et la sélection d'un caractère B lorsque A et B sont coextensifs : les ours polaires ont-ils été sélectionnés pour leur couleur blanche, ou parce qu'ils sont adaptés à leur environnement ? Je n'en sais rien; et aucun des types d'adaptationnismes dont j'ai entendu parler n'en sait rien non plus. Et je ne parierais pas qu'on soit près de le savoir.

Aspect empirique. Il ne serait pas déraisonnable pour un biologiste d'obédience darwinienne de tenir le raisonnement suivant : « Les questions conceptuelles et ceux qui les soulèvent nous cassent les pieds. On ne peut pas se passer de la biologie et la biologie ne peut pas se passer du darwinisme. Donc le darwinisme doit être vrai. » De fait, les darwinistes raisonnent souvent de cette manière, et la crainte de l'hyperbole ne semble pas les freiner. Le biologiste Theodosius Dobzhansky disait que rien n'a de sens en biologie sans le darwinisme [la phrase exacte est « rien en biologie n'a de sens, si ce n'est à la lumière de l'évolution » (1973)], et il est communément paraphrasé. Le philosophe Daniel Dennett affirme : « d'un seul coup l'idée d'évolution par sélection naturelle unifie le domaine de la vie, du sens et de l'intentionnalité et celui de l'espace et du temps, des causes et des effets, du mécanisme et des lois physiques » (ouf !). Richard Dawkins déclare : « Si des créatures supérieures venant de l'espace visitent un jour la Terre, la première question qu'elles poseraient, pour déterminer le niveau de notre civilisation, serait la suivante : "Ont-ils déjà découvert l'évolution ?" » Prenez un traité darwiniste et vous êtes sûr de trouver, en général dans le premier chapitre, des affirmations du caractère indispensable de l'adaptationnisme. Eh bien, si l'adaptationnisme est réellement la seule chose qui soit digne d'être considérée, si le reste de la biologie le présuppose réellement, nous ferions mieux d'y adhérer malgré tous ses défauts. Ce qui est indispensable, on ne peut donc pas s'en dispenser, comme aurait pu dire Wittgenstein. Mais ce qu'il y a de nouveau, c'est que des alternatives sérieuses à l'adaptationnisme ont commencé à émerger, qui sauvegardent l'idée essentielle de l'évolution des phénotypes mais s'écartent plus ou moins de la théorie darwinienne selon laquelle la sélection naturelle est le mécanisme de cette évolution. Il y a désormais beaucoup plus de choses de ce genre que je ne peux en passer en revue ici, mais un exemple ou deux peuvent donner une idée.

L'adaptationnisme est une forme de ce que l'on pourrait appeler « l'environnementalisme » en biologie (ce n'est en aucun cas la seule forme : la théorie de l'apprentissage de Skinner en est un autre bon exemple). L'idée de base est que là où l'on trouve une structure phénotypique, on peut généralement trouver dans l'environnement une

structure correspondante qui en est la cause. La phylogénie nous explique que les phénotypes ne se produisent pas par hasard : ils forment un arbre taxinomique plus ou moins ordonné. Dès lors, il doit y avoir dans les variables environnementales quelque chose de non aléatoire qui donne une forme à l'arbre taxinomique. Dennett a très bien exprimé cette idée :

« Les structures fonctionnelles sont porteuses d'une information implicite sur l'environnement dans lequel leur fonction est mise en œuvre. Les ailes d'une mouette [...] supposent que la créature qui les possède est admirablement adaptée au vol dans un milieu ayant la masse spécifique et la viscosité de l'atmosphère à un millier de mètres au-dessus du niveau de la mer. »

Ainsi, les phénotypes sont porteurs d'informations sur l'environnement dans lequel ils ont évolué, un peu comme la taille, la forme, etc., d'un cratère sont porteuses d'informations sur la taille, la forme, etc., de la météorite qui l'a creusé. En résumé, les phénotypes ne sont pas des amas aléatoires de caractères et, s'il n'y a pas de hasard, cela n'arrive pas par hasard ; moins il y a de hasard, moins il est probable que cela soit le résultat du hasard. C'est une tautologie. Donc, si la nature non aléatoire des phénotypes n'est pas le reflet de l'ordre de l'intention divine, peut-être est-ce le reflet de l'ordre de l'environnement dans lequel les phénotypes ont évolué. Voici, en un mot, la théorie de la sélection naturelle.

Or, dès lors qu'elle est formulée de cette manière, on voit que ce n'est pas la seule possibilité. Les environnements externes sont structurés de toutes sortes de manières, mais il en va de même de l'intérieur des créatures qui les habitent. Ainsi, en principe au moins, il existe une alternative à l'idée darwinienne selon laquelle les phénotypes «sont porteurs d'informations implicites sur» les environnements dans lesquels ils évoluent : à savoir, qu'ils sont porteurs d'une information implicite sur les structures endogènes de la créature qui les possède. Cette idée est actuellement affublée du sobriquet d'« évo-dévo » (l'abréviation de « théorie évolutionniste du développement »). Tout le monde pense que l'« évo-dévo » doit receler au moins une part de

vérité, puisque personne ne croit que les phénotypes sont façonnés directement par les variables environnementales. Même les darwinistes les plus inconditionnels admettent que l'environnement agit sur le phénotype d'un être vivant par l'intermédiaire de ses effets sur les gènes de cet être vivant, son « génome ». De fait, dans le cas typique, l'environnement sélectionne un phénotype en sélectionnant un génome que le phénotype exprime. Une fois établi, ce type de raisonnement s'étend à d'autres facteurs endogènes. La structure phénotypique est porteuse d'informations sur la structure génétique; la structure génotypique est porteuse d'informations sur la biochimie des gènes; la structure biochimique des gènes est porteuse d'informations sur leur structure physique; et ainsi de suite, jusqu'à la mécanique quantique, et que sais-je encore. En bref, c'est une question totalement empirique de savoir dans quelle mesure ce sont les variables exogènes qui façonnent les phénotypes ; et il est parfaitement possible que l'adaptationnisme soit la mauvaise réponse.

•

On peut concevoir que le discours darwinien sur l'évolution a pour origine la question suivante : pourquoi certains phénotypes se ressemblent-ils plus que d'autres ? La réponse de Darwin était que cette similitude phénotypique s'explique assez généralement par un ancêtre commun, et que plus les phénotypes de deux êtres vivants sont semblables, moins leur dernier ancêtre commun est éloigné dans le temps. Il existe des exemples ponctuels du cas contraire, mais il n'y a pas de doute sérieux sur le fait que ce discours soit fondamentalement vrai. Et si ce n'est pas la meilleure idée que quelqu'un ait jamais eue, elle est assez bonne d'après tous les critères locaux. Si l'on pose la question de Darwin (pourquoi les phénotypes sont-ils souvent ressemblants ?), on tombe, de fait, sur la réponse de Darwin. Mais si, à la place, on demande pourquoi certains phénotypes n'existent pas, une explication adaptationniste paraît souvent peu vraisemblable, voire ridicule. Par exemple, personne, pas même les adaptationnistes les plus enragés, ne chercherait à expliquer l'absence de porcs ailés en prétendant qu'il y en a bien eu, mais que les ailes se sont révélées être un handicap, de sorte

que la nature les a sélectionnées négativement. Nul ne s'attend à trouver des fossiles d'une espèce de porcs ailés qui serait aujourd'hui éteinte.

Plus exactement, les porcs n'ont pas d'ailes parce qu'il n'y a sur eux aucun endroit où en mettre. Pour ajouter des ailes à un porc, il faudrait remanier en même temps beaucoup d'autres choses. En fait, il faudrait reconstruire le porc de fond en comble : une masse plus faible, une musculature appropriée, un mécanisme de navigation dans les trois dimensions, une silhouette aérodynamique, et Dieu sait quoi d'autre; sans parler des plumes. La morale est que si l'on veut que les porcs aient des ailes, il faut revoir radicalement leur conception. Mais la sélection naturelle, qui est progressive et cumulative, ne peut pas faire ce genre de choses. L'évolution par sélection naturelle est fondamentalement un processus conservateur, et une fois qu'on s'est engagé sur la route évolutive qui mène à l'état de porc, les possibilités ultérieures sont considérablement réduites ; on ne peut pas, par exemple, revenir en arrière et modifier la structure pour ajouter des plumes.

Tout cela semble raisonnable à première vue ; mais il faut noter que ce genre de « canalisation » impose des types de contraintes sur l'évolution des phénotypes qui ne peuvent s'expliquer par la sélection naturelle. Combien y a-t-il de cas de ce genre ? Est-il fréquent qu'un phénotype soit porteur d'informations, non pas sur l'environnement de l'être vivant, mais sur des aspects de sa structure endogène ? Personne ne le sait.

Mais cela souligne le fait que, dans cette manière de concevoir l'évolution, les mécanismes de construction des phénotypes peuvent très bien être nombreux et diversifiés. C'est là un des principaux points de divergence entre l'« évo-dévo » et l'adaptacionisme. Les darwinistes soutiennent généralement que la sélection naturelle, même si ce n'est pas la seule chose à l'œuvre dans l'évolution, est de loin la part la plus importante. A l'inverse, il n'est pas concevable que la canalisation explique à elle seule la structure des phénotypes. Mais cela laisse sans réponse la question de savoir si elle pourrait faire partie des nombreux mécanismes par lesquels les phénotypes expriment une structure endogène et qui, pris ensemble, expliquent une petite ou une grande partie, ou encore la totalité des faits de l'évolution. Si, comme je le

pense, la notion de sélection naturelle est imparfaite, de telles alternatives seraient particulièrement bienvenues.

Voici un autre type de processus qui semble expliquer certains faits (très frappants) concernant la formation des phénotypes, mais qui est totalement différent à la fois de l'adaptation et de la canalisation. En fait, cela nous ramène aux pendentifs de Saint-Marc. Gould et Lewontin affirment que ces éléments sont des artéfacts de la sélection des arcs. S'il n'y a pas d'arcs, les coupoles s'écroulent; donc les arcs sont sélectionnés pour soutenir les coupoles. Mais les arcs sont associés aux pendentifs pour des raisons de géométrie; donc les pendentifs n'ont pas été sélectionnés pour eux-mêmes, ce sont des « passagers clandestins » de la sélection des arcs. La morale est que les caractères phénotypiques peuvent être porteurs d'informations sur les relations entre les mécanismes qui les produisent. Le comportement de passager clandestin suggère toujours des relations de ce type, et il est omniprésent dans l'évolution.

Il existe une superbe expérience qui nous en donne un exemple. L'hypothèse de travail a été brièvement résumée par Lyudmila Trut dans la revue *Scientific American* en 1999 :

« Puisque le comportement a des racines biologiques, la sélection de la domestication et de la résistance aux agressions suppose la sélection de modifications physiologiques dans les systèmes qui régissent les hormones et les substances neurochimiques du corps. Ces modifications, à leur tour, ont pu avoir des effets d'une portée considérable sur le développement des animaux eux-mêmes, des effets qui pourraient bien expliquer pourquoi des animaux différents réagissent de manière semblable lorsqu'ils sont soumis aux mêmes types de pressions de sélection. »

Pour reprendre les termes que j'ai employés, on pourrait s'attendre à ce qu'une multitude d'autres caractères phénotypiques soient intrinsèquement liés à la domestication, et qu'ils accompagnent ainsi clandestinement la sélection de cette dernière. De telles propriétés coévolueraient avec la domestication, même si elles n'avaient que peu ou pas d'effet systématique sur les aptitudes ; en fait, il y aurait évolution sans adaptation. En outre, dans la mesure où les mécanismes génétiques et physiologiques qui relient la domestication à ses passagers clandestins

sont communs à toute une série d'espèces, on pourrait s'attendre à ce que la sélection de la domestication ait des produits dérivés phénotypiques semblables dans des êtres vivants de types très différents.

La vérification expérimentale de ces hypothèses a impliqué quarante ans de croisements consanguins et de sélection de la domestication sur une trentaine de générations de renards argentés. Les résultats sont impressionnants. D'une part, les renards qui ont été sélectionnés pour la domestication tendaient aussi à partager un certain nombre d'autres caractères phénotypiques.

À la différence de leurs cousins sauvages, ils tendaient à acquérir des oreilles tombantes, une mue brune, des poils gris, une queue courte et recourbée, des pattes courtes et une coloration pie (en particulier des touches de couleur blanche). La sélection de la domestication a également eu des effets caractéristiques sur le cycle reproductif des renards et sur la taille moyenne de leur portée. Et ce sont là tous des caractères que les autres animaux domestiques (chiens, chats, chèvres, vaches) tendent aussi à avoir. Un adaptationniste pourrait bien se demander en quoi les queues recourbées des chiens, des chats, etc., sont bien adaptées dans une écologie de la domestication. La réponse, à ce qu'il semble, est : «en rien». Les queues recourbées n'améliorent pas l'adaptation, il se trouve simplement qu'elles sont liées à la domestication, de sorte qu'en sélectionnant l'une on sélectionne l'autre, bon gré, mal gré.

Ce cas est très semblable à celui des pendentifs, mais également bien pis, du point de vue d'un adaptationniste. On peut expliquer la relation entre les coupoles, les arcs et les pendentifs : c'est la géométrie et la mécanique de la structure qui l'exigent. Mais les effets phénotypiques secondaires de la sélection de la domestication semblent être parfaitement arbitraires. En particulier, il ne s'agit apparemment pas d'adaptations ; il n'y a aucune explication téléologique, aucune explication en termes d'adaptation, au fait que les animaux domestiques tendent à avoir des oreilles tombantes. Ils en ont, tout simplement. Il est possible, naturellement, que la canalisation et l'état de passager clandestin ne soient que des hasards extraordinaires, et que la majeure partie, voire la totalité

des autres déterminants des structures phénotypiques soit exogène. Il est également possible que les paléontologues exhument un jour des porcs ailés. Mais ne parions pas là-dessus.

•

Ainsi, quelle est la morale de tout cela ? Tout d'abord, c'est que le discours darwiniste classique sur l'évolution dirigée principalement par la sélection naturelle est en difficulté dans ses fondements à la fois conceptuels et empiriques. Darwin était par trop un environnementaliste. Il semble avoir été séduit par une analogie avec la sélection dans l'élevage, la sélection naturelle agissant en lieu et place de l'éleveur. Mais cette analogie est de toute évidence discutable; la sélection artificielle n'est réalisée que par des êtres qui ont un entendement, et la sélection naturelle n'en a pas. L'alternative à Darwin est que la direction des changements phénotypiques est très largement déterminée par des variables endogènes. Or la littérature actuelle suggère que des modifications dans la chronologie des processus développementaux contrôlés génétiquement constituent souvent des variables endogènes de choix ; d'où le « dévo » dans « évo-dévo ».

Mais je crois qu'il y a également une morale concernant l'attitude que nous devons adopter à l'égard de notre science. Après Darwin, on a vu une remarquable prolifération d'autres théories, chacune cherchant à récupérer la sélection naturelle pour ses propres besoins. La psychologie évolutive en est actuellement la plus éminente illustration, mais les autres exemples sont légion. On peut en trouver plus ou moins dans toutes les sciences du comportement, sans parler de l'épistémologie, de la sémantique, de la théologie, de la philosophie de l'histoire, de l'éthique, de la sociologie, de la théorie politique, de l'eugénisme et même de l'esthétique. Ce qu'ils ont en commun, c'est qu'ils tentent d'expliquer pourquoi nous sommes comme ceci ou comme cela en regardant ce que cela nous rapporte d'être comme ceci ou comme cela, ou ce que cela a rapporté à nos ancêtres.

« Nous aimons raconter des histoires parce que raconter des histoires exerce l'imagination et que l'imagination était une chose qu'il était bon d'avoir pour un chasseur-cueilleur. » « Nous n'acceptons pas que l'on

mange les grands-mères parce que dans une écologie de chasseurs-cueilleurs il était utile qu'elles restent assises près des bébés. » « Nous aimons la musique parce que chanter ensemble renforce les liens entre les chasseurs et les cueilleurs (et/ou entre les chasseurs-cueilleurs adultes et leur progéniture). » « Nous parlons en produisant des sons et non en agitant les mains ; c'est parce que les chasseurs-cueilleurs vivaient dans la savane et avaient du mal à se voir les uns les autres dans les herbes hautes. » « Nous aimons colporter les ragots parce que savoir qui a fait quoi est important lorsque la survie dépend de la coopération dans de petites communautés. » « Nous ne parlons pas tous la même langue car cela augmenterait nos chances de nous reproduire avec des étrangers (ce qui serait mauvais parce que cela affaiblirait les liens des communautés de chasseurs-cueilleurs). » « Nous ne copulons pas avec nos frères et sœurs parce que cela diminuerait la probabilité de nous reproduire avec des étrangers (ce qui serait mauvais car, toutes choses étant égales par ailleurs, il est bon que notre pool génétique soit hétérogène). »

En fait, je n'invente rien. On peut trouver effectivement des versions de chacune de ces théories dans la littérature adaptationniste. Mais sur un plan logique, ce type d'explication doit s'arrêter quelque part. Tous nos caractères ne peuvent s'expliquer de manière déterministe; il doit y en avoir certains que nous avons simplement parce que c'est ce type-là de créatures que nous sommes. Et peut-être n'est-il pas nécessaire de faire observer que de telles explications sont en soi *ad hoc* (Gould les appelait des *just-so stories*, des « histoires comme ça »), ni que, nonobstant le prestige qu'elles tirent de la théorie de la sélection naturelle, il n'y a guère de raison de croire que l'une d'entre elles est vraie. La marée haute de l'adaptationnisme a soulevé une flotte bien disparate, mais il se pourrait que nous en soyons maintenant au reflux. S'il s'avère que ce n'est pas la sélection naturelle qui dirige l'évolution, beaucoup de spéculations détachées vont s'échouer, et avoir l'air un peu ridicule. Par induction d'après l'histoire des sciences, on peut penser que les meilleures théories d'aujourd'hui se révéleront plus ou moins inexactes au plus tard demain après-midi. En science comme ailleurs, c'est généralement un bon conseil à donner que de recommander d'ouvrir un parapluie.

•

Pour en revenir à Sachs, je n'aurais pas l'idée d'affirmer que nous sommes presque toujours heureux ou presque toujours bons. Mais je doute que la raison en soit ce pour quoi nos esprits ont été sélectionnés. Peut-être le vrai problème est-il que nos neurones ne sont pas correctement connectés les uns aux autres, ou que certaines de nos hormones ne sont pas entièrement fiables ; avec pour conséquence, dans un cas comme dans l'autre, que le fait d'obtenir certaines des choses que nous voulons est incompatible avec le fait d'obtenir les autres. Ou bien que nous ne pouvons pas obtenir du tout certaines d'entre elles. Quoi qu'il en soit, mon avis vaut ce qu'il vaut, mais je serais vraiment très surpris de découvrir que j'étais destiné à être un chasseur- cueilleur, car je ne ressens pas la moindre nostalgie à l'égard de ce genre de vie. J'ai horreur de l'idée même de la chasse, et je ne suis pas du tout fanatique non plus de la cueillette. Et je ne crois pas que vivre comme un chasseur-cueilleur me rendrait plus heureux ou meilleur. En fait, cela m'a l'air d'être l'enfer absolu. Pas d'opéra. Ni de plomberie.

Jerry A. Fodor (1935-2017).

Traduit de l'anglais par Stéphane Schmitt.

Jerry A. Fodor enseigne la philosophie à l'université Rutgers.

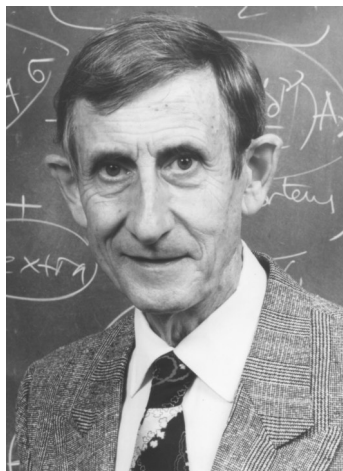
Il est notamment l'auteur de *La Modularité de l'esprit. Essai sur la psychologie des facultés* (Paris, Éd. de Minuit, 1986) et de *L'esprit, ça ne marche pas comme ça. Portée et limites de la psychologie computationnelle* (Paris, Odile Jacob, 2003).

Article publié dans la *London Review of Books*, octobre 2007.

<https://www.lrb.co.uk/the-paper/v29/n20/jerry-fodor/why-pigs-don-t-have-wings>

Freeman J. Dyson

L'avenir des biotechnologies



Hérissons et renards

Les scientifiques se répartissent en deux catégories, les hérissons et les renards. J'emprunte cette terminologie à Isaiah Berlin¹ qui lui-même l'avait empruntée au poète grec antique Archiloque. Ce dernier nous rapporte que si les renards connaissent beaucoup d'astuces, les hérissons n'en connaissent qu'une seule. Les renards se diversifient, les hérissons approfondissent. Les renards s'intéressent à tout et passent facilement d'un problème à l'autre. Les hérissons ne s'intéressent qu'à quelques problèmes qu'ils considèrent à fond, et restent collés à ces mêmes problèmes durant des années ou des décennies. La plupart des grandes découvertes sont réalisées par des hérissons, la plupart des petites par des renards. La science a besoin à la fois de hérissons et de renards pour grandir sainement : elle a besoin des premiers pour creuser en profondeur la nature des choses, des seconds pour explorer les détails compliqués de notre merveilleux univers. Charles Townes, qui a inventé le laser, et Enrico Fermi, qui a construit le premier réacteur nucléaire à Chicago, étaient des renards. Il arrive souvent que les renards soient aussi créatifs

¹ Isaiah Berlin, *The Hedgehog and the Fox : An Essay on Tolstoy's View of History*, New York, Ivan Dee, 1953

que les hérissos. Le laser a été une grande découverte faite par un renard. Le grand public est induit en erreur par les médias qui lui font croire que tous les grands scientifiques sont des hérissos. Certaines périodes de l'histoire des sciences sont bonnes pour les hérissos, d'autres sont bonnes pour les renards. Le début du XX^e siècle a été bon pour les hérissos. Ces derniers (Einstein et ses successeurs en Europe, Hubble et ses successeurs en Amérique) ont creusé profondément et ont établi de nouvelles fondations pour la physique et l'astronomie. Lorsque Fermi et Townes sont entrés en scène au milieu du siècle, les fondations étaient solides et l'univers était grand ouvert aux explorations des renards. La plupart des progrès en physique et en astronomie depuis les années 1920 ont été accomplis par des renards.

Un autre renard qui a joué un rôle important dans la science du XX^e siècle est John von Neumann. Von Neumann s'intéressait presque à tout et apporta d'importantes contributions dans de nombreux domaines. Dans les années 1920, il découvrit la première formulation axiomatique de la théorie des ensembles qui était dégagée de toute contradiction logique, une avancée qui permit à son ami hérisson Kurt Gödel de prouver son fameux théorème sur l'existence de propositions indécidables en arithmétique. Gödel continua à être un hérisson, et von Neumann continua à être un renard. Après avoir conforté sa théorie, von Neumann inventa la théorie des jeux, découvrit la première formulation mathématique rigoureuse de la mécanique quantique et étudia l'architecture logique des machineries automatiques et des cerveaux humains. Il y a cinquante ans, à Princeton, je l'ai vu élaborer et construire le premier ordinateur électronique qui fonctionnait avec des instructions codées dans la machine. Il n'a pas inventé l'ordinateur électronique : l'ordinateur appelé ENIAC fonctionnait déjà à l'Université de Pennsylvanie cinq ans plus tôt. Ce que Neumann a inventé, c'est le *software*, les instructions codées qui donnent à l'ordinateur son habileté et sa souplesse. C'est la combinaison du *hardware* électronique avec le *software* à carte perforée qui a permis à une simple machine de prédire le temps, de simuler l'évolution de populations d'êtres vivants et de tester la faisabilité des bombes à hydrogène.

J'ai eu la chance de me trouver à l'Institut d'études avancées à Princeton dans les années 1940 et 1950, lorsque le projet d'ordinateur de von Neumann commença. Il invita des jeunes gens dynamiques de partout dans le monde pour ouvrir de nouveaux champs scientifiques rendus possibles par l'ordinateur. Le groupe le plus nombreux était celui des météorologistes, qui fondèrent la science de la modélisation du climat. Un autre groupe était celui des mathématiciens, qui ont fondé ce qui deviendrait par la suite la science informatique. Un autre encore était celui des concepteurs de la bombe à hydrogène, qui amenaient secrètement leurs codes pour faire tourner la machine pendant la nuit. Et il y avait Nils Barricelli, un biologiste isolé qui utilisait des codes pour simuler l'évolution biologique. Il fonda la science de la vie artificielle quarante ans avant qu'elle ne devienne à la mode. Von Neumann s'intéressait à toutes ces activités, mais avant tout à la météorologie. Il avait de grandes idées dans ce domaine. Je me souviens de lui donnant une conférence sur l'avenir de la météorologie. Il disait :

« Dès que nous serons capables de simuler la dynamique des fluides atmosphériques sur un ordinateur avec une précision adéquate, nous pourrons utiliser des tests simples pour déterminer si la situation est stable ou instable. Si elle est stable, nous pourrons prédire ce qui se passera ensuite. Si elle est instable, nous pourrons envoyer une petite perturbation pour contrôler ce qui se passera ensuite. Les perturbations nécessaires peuvent être produites par des avions de haute altitude dotés de générateurs de fumée, qui réchauffent l'atmosphère là où la fumée absorbe les rayons du soleil et qui la refroidissent dans la région obscurcie située en dessous. Ainsi nous serons les maîtres du temps. Tout ce que nous ne pourrons contrôler, nous le prédirons, et tout ce que nous ne pourrons prédire, nous le contrôlerons. »

Il estimait que cela prendrait environ dix ans pour mettre au point un ordinateur qui nous donnerait ce type de contrôle sur le temps.

Évidemment von Neumann avait tort. C'était un grand mathématicien mais un très mauvais prophète de l'avenir. Je n'ai aucune illusion sur le fait d'être un meilleur prophète que lui. C'est pourquoi je vais écrire ici essentiellement sur le passé. Le passé est beaucoup plus facile à prédire. Von Neumann avait tort parce qu'il ne

savait rien du chaos. Il s'imaginait que si une situation atmosphérique était instable, il pouvait toujours envoyer une petite perturbation pour la transformer en situation stable et par conséquent prédictible. En réalité ce n'est pas vrai. La plupart du temps, lorsque l'atmosphère est instable, le mouvement est chaotique, c'est-à-dire que chaque petite perturbation ne fait que la transformer en une autre situation instable qui est tout aussi imprévisible. Lorsque le mouvement est chaotique, il ne peut être ni prédit ni contrôlé. Le rêve de von Neumann était donc une illusion. Mais le fait que les équations de la météorologie ont des solutions chaotiques n'a été découvert au mit par le météorologue Edward Lorenz qu'en 1961, quatre ans après la mort de von Neumann.

Von Neumann a fait une autre prédiction qui s'est également révélée fausse. Il a prédit, à juste titre, que son invention de l'ordinateur électronique avec des logiciels programmables changerait le monde. Il a compris que les descendants de cette machine allaient régir les actions de la science, des affaires et du gouvernement. Mais il imaginait que les ordinateurs allaient devenir de plus en plus grands et de plus en plus chers à mesure qu'ils deviendraient plus puissants. Il les imaginait comme des installations géantes au service de grands laboratoires de recherche ou de grandes industries. Selon la légende, quelqu'un du gouvernement lui demanda un jour de combien d'ordinateurs les États-Unis auraient besoin dans l'avenir, et il répondit : « dix-huit ». Je ne sais pas si cette légende a le moindre fondement dans la réalité. Mais il est certainement vrai que von Neumann n'avait aucune idée de l'avenir réel des ordinateurs. Il ne lui est jamais venu à l'esprit que les ordinateurs puissent devenir plus petits et moins chers à mesure qu'ils deviendraient plus rapides et plus performants. Il n'a jamais imaginé qu'ils deviendraient suffisamment petits et bon marché afin que les ménagères les utilisent pour remplir leur déclaration de revenu et les enfants pour faire leurs devoirs. Il n'a absolument pas réussi à prévoir qu'ils seraient intégrés aux foyers sous forme de jouets pour des enfants de trois ans. Il n'a pas réussi à prévoir que l'apparition de jeux sur ordinateur deviendrait l'une des caractéristiques principales de la vie au XXI^e siècle. A cause des jeux sur ordinateur, nos petits-enfants sont en train de grandir avec une irréversible addiction aux ordinateurs. Pour le

meilleur ou pour le pire, dans la maladie ou la santé, jusqu'à ce que la mort les sépare, les humains et les ordinateurs sont désormais unis plus durablement que les maris et les femmes.

En plus de distraire nos petits-enfants, l'entrée des ordinateurs dans nos foyers a également donné des outils à de nombreuses petites entreprises scientifiques. De petits ordinateurs bon marché ont permis que de petites entreprises offrent des contributions sérieuses à la science et qu'elles rivalisent avec les grandes entreprises. Des astronomes d'un petit observatoire peuvent découvrir une planète tellurique à des milliers d'années-lumière en mesurant avec précision la convergence gravitationnelle que cette planète exerce sur la lumière d'une étoile plus éloignée. Des chimistes travaillant avec un appareil sur un coin de table peuvent mesurer précisément la production de gaz deux cents kilomètres plus bas dans le manteau terrestre. Le premier ordinateur de von Neumann à Princeton avait une capacité de mémoire totale de quatre kilobytes. Actuellement, un scientifique qui entreprend un petit projet peut facilement se procurer une base de données de quatre gigabytes, un million de fois plus grande que la mémoire de von Neumann et bien moins chère. Les gros projets ont aujourd'hui des bases de données contenant des millions de gigabytes. Ces mémoires de millions de gigabytes sont chères et nécessitent des équipes d'experts pour les organiser efficacement. Un petit projet qui requiert seulement quelques gigabytes peut avoir un avantage compétitif. Les renards qui organisent de petits projets à leurs moments perdus peuvent avancer plus rapidement que les hérissons qui consacrent toute leur vie aux gros projets.

Je ne suis pas en train de prédire que le XXI^e siècle sera l'âge d'or des renards et n'aura pas besoin de hérissons. Je dis simplement que l'histoire des sciences montre une alternance de périodes où les hérissons sont dominants et de périodes où ce sont les renards. Les hérissons étaient dominants au XVII^e siècle, l'époque de Kepler et de Newton. Les renards étaient dominants au XVIII^e siècle, l'époque d'Euler et de Franklin. Les hérissons étaient dominants au début du XX^e siècle, l'époque d'Einstein et de Dirac. Les renards étaient dominants au milieu du XX^e siècle, l'époque

de Fermi et de Townes. Peut-être avons-nous besoin maintenant d'une nouvelle ère de hérissons pour bouleverser les fondements de la science. Ou peut-être pas. L'avenir est imprévisible. Dans tous les cas, que les hérissons reviennent ou non pour provoquer une révolution scientifique majeure, il y aura toujours besoin de renards pour poursuivre la gestion normale de la science. Au cours du siècle à venir, quoi que les hérissons pourront faire, la démocratisation de la haute technologie donnera aux renards de nouvelles occasions d'obtenir de grands résultats avec des moyens limités.

La démocratisation de la haute technologie

Non seulement les ordinateurs, mais aussi les autres instruments scientifiques de haute précision se sont démocratisés au cours des vingt dernières années. Le cas le plus spectaculaire de démocratisation de haute technologie est le GPS ou Système de positionnement global (*Global Positioning System*). Il y a vingt ans, le GPS était un programme militaire secret et les données de localisation n'étaient disponibles pour les civils que sous forme dégradée. Désormais, les données les plus précises sont intégralement accessibles à tout le monde, permettant une localisation exacte du récepteur dans l'espace et le temps à un prix accessible aux randonneurs et aux marins ordinaires. De même, les caméras numériques qui donnent instantanément des images de haute qualité sont vendues désormais dans toutes les boutiques spécialisées et rendent rapidement obsolètes les caméras traditionnelles. Ces caméras numériques ont également provoqué une révolution en astronomie. Au départ, quand les caméras numériques étaient encore expérimentales et chères, elles n'étaient employées que dans de grands observatoires professionnels. Mais maintenant, depuis qu'elles ont été démocratisées, elles sont utilisées de manière routinière dans les petits observatoires et par les astronomes amateurs. Les caméras numériques, associées au traitement de données par les ordinateurs personnels, permettent aux amateurs et aux étudiants de réaliser des types d'observations scientifiques précises qui ne pouvaient être effectuées auparavant que par des astronomes professionnels avec de gros instruments. La

démocratisation de la haute technologie rendra les petits projets de plus en plus rentables au cours du temps.

Cela fait désormais partie des idées couramment admises de dire que le XX^e siècle a été le siècle de la physique et que le XXI^e sera celui de la biologie. Presque tout le monde s'accorde sur deux choses au sujet du siècle à venir. La biologie est maintenant plus importante que la physique, à en juger par l'étendue des budgets, celle de la main-d'œuvre, ou la quantité de découvertes majeures réalisées; et la biologie va probablement rester la partie la plus importante de la science au cours du XXI^e siècle. Elle est également plus importante que la physique si on la mesure à ses conséquences économiques, ses implications éthiques ou ses effets sur le bien-être de l'homme. Tous ces faits soulèvent une intéressante question. La démocratisation de la haute technologie, dont nous avons vu la marche triomphale avec l'arrivée des ordinateurs personnels, des récepteurs GPS et des caméras numériques, s'étendra-t-elle bientôt de la technologie physique à la biotechnologie ? Je crois que la réponse à cette question est oui. Ici je suis assez téméraire pour faire une prédiction catégorique. Je prédis que la démocratisation de la biotechnologie dominera notre vie au cours des cinquante prochaines années, au moins autant que la démocratisation des ordinateurs l'a dominée au cours des cinquante dernières.

Je vois une analogie étroite entre la vision limitée qu'avait von Neumann des ordinateurs comme des équipements lourds et centralisés et la perception qu'a le public d'aujourd'hui du génie génétique comme activité de grands groupes pharmaceutiques et agronomiques tels que Monsanto. Le public se méfie de Monsanto parce que Monsanto aime mettre des gènes de pesticides toxiques dans des plantes alimentaires, de même que nous nous méfions de von Neumann parce qu'il aimait utiliser son ordinateur pour mettre au point des bombes à hydrogène en secret la nuit. Il est probable que le génie génétique restera impopulaire et controversé tant qu'il restera une activité centralisée aux mains de grands groupes.

Je vois un avenir brillant pour l'industrie biotechnologique lorsqu'elle aura suivi la voie de l'industrie informatique, la voie que von Neumann

n'a pas réussi à prévoir, celle qui va vers la miniaturisation et la démocratisation plutôt que vers de gros équipements centralisés. La première étape dans cette direction a déjà été effectuée récemment, lorsqu'un poisson tropical génétiquement modifié, avec des couleurs nouvelles et brillantes, est apparu dans les boutiques animalières. Pour que les biotechnologies soient démocratisées, la prochaine étape est qu'elles deviennent conviviales. J'ai récemment passé une excellente journée au Philadelphia Flower Show, les plus importantes florales du monde, où les créateurs de fleurs du monde entier exposent les résultats de leurs efforts. J'ai également visité l'exposition de reptiles de San Diego, qui est tout aussi impressionnante et montre le travail d'un autre type d'éleveurs. Philadelphie excelle en roses et en orchidées, San Diego en lézards et en serpents. Le principal problème pour les grands-parents qui visitent l'exposition de reptiles avec leurs petits-enfants est de les faire ressortir du bâtiment sans avoir acheté de serpent. Chaque orchidée, rose, lézard ou serpent est l'œuvre d'un éleveur passionné et habile. Il existe des milliers de gens, amateurs et professionnels, qui consacrent leur vie à cette activité. Imaginez maintenant ce qui se passera lorsque les outils du génie génétique deviendront accessibles à tous ces gens. Il y aura des kits « faites-le vous-mêmes » [*do it yourself*, DIY] pour les jardiniers qui utiliseront le génie génétique pour produire de nouvelles variétés de roses et d'orchidées, ainsi que des kits pour les amateurs de pigeons et de perroquets, de lézards et de serpents, qui produiront de nouvelles variétés d'animaux domestiques. Les éleveurs de chats et de chiens auront eux aussi leurs kits.

Les biotechnologies démocratisées, une fois entre les mains des ménagères et des enfants, nous donneront une explosion de diversité de nouveaux êtres vivants plutôt que des monocultures telles que les préfèrent les grands groupes. De nouvelles lignées proliféreront et remplaceront celles que les exploitations de monocultures et la déforestation ont détruites. Mettre au point des génomes sera une affaire personnelle, une nouvelle forme d'art tout aussi créative que la peinture ou la sculpture. Quelques-unes des nouvelles créations seront des chefs-d'œuvre, mais toutes apporteront de la joie à leurs créateurs et de la variété à notre flore et notre faune. L'étape finale dans la

démocratisation des biotechnologies sera celle des jeux « *biotech* », destinés comme les jeux sur ordinateur aux enfants dès la crèche, mais qui se joueront avec des œufs et des graines réels plutôt qu'avec des images sur un écran. En jouant à ce type de jeux, les enfants acquerront une appréhension intime des organismes qu'ils feront grandir. Le gagnant pourrait être l'enfant dont les graines donnent le cactus le plus épineux, ou celui dont les œufs donnent le dinosaure le plus mignon. Ces jeux seront sales et peut-être dangereux. Des règles et des réglementations seront nécessaires pour s'assurer que nos enfants ne mettent en danger ni eux-mêmes ni les autres. Les dangers des biotechnologies sont réels et sérieux.

Si l'avenir est la démocratisation des biotechnologies, il faut répondre à cinq questions importantes. Premièrement, peut-on l'arrêter ? Deuxièmement, faut-il l'arrêter ? Troisièmement, s'il n'est pas possible ou pas souhaitable de l'arrêter, quelles sont les limites convenables que notre société doit lui imposer ? Quatrièmement, comment ces limites doivent-elles être déterminées ? Cinquièmement, comment faut-il les faire respecter, à l'échelle nationale et internationale ? Je n'essaierai pas de répondre à ces questions ici. Je les laisse à nos enfants et à nos petits-enfants.

La forme réelle que prendront les biotechnologies démocratisées est pour nous aussi impossible à déterminer aujourd'hui que l'était celle de l'ordinateur personnel pour von Neumann en 1950. Le mieux que je puisse faire est de décrire les fonctions d'un kit biotechnologique « à faire soi-même ». Je ne peux pas deviner la forme des machines qui réaliseront ces fonctions. Le kit aura cinq fonctions principales. Premièrement, faire pousser les plantes sous des conditions contrôlées. Cela demande un jardin ou une serre avec les outils et les apports chimiques habituels. Deuxièmement, faire grandir des animaux dans des conditions contrôlées. Cela demande des écuries pour les gros animaux ou des cages pour les petits, avec les apports habituels en nourriture et médicaments. Troisièmement, il faudra des instruments simples et conviviaux permettant à des gens non expérimentés de manipuler les graines, les œufs ou les embryons. Quatrièmement, un

séquenceur génomique de poche capable de séquencer des molécules d'ADN isolées. L'ADN est la molécule d'acide nucléique qui porte l'information génétique, et séquencer l'ADN d'un être vivant revient à lire son génome. Cinquièmement, un synthétiseur génomique de poche capable de synthétiser des quantités substantielles d'ADN de la séquence désirée. Ces deux derniers instruments n'existent pas actuellement, mais il est probable qu'ils existeront d'ici dix ou vingt ans, car ils auront un grand intérêt commercial pour les industries pharmaceutiques et une grande valeur pratique pour la médecine et la recherche scientifique.

Quel usage les scientifiques feront-ils de ces kits de biotechnologies démocratisés quand ils se seront répandus ? Une bonne réponse à cette question a été donnée par Herbert Kroemer, de Santa Barbara, qui a reçu le prix Nobel en l'an 2000 pour avoir inventé un nouveau type de matériaux semi-conducteurs. Dans le discours qu'il a prononcé à cette occasion, il a déclaré :

« Les principales applications de toute technologie suffisamment nouvelle et innovante ont toujours été et continueront à être des applications créées par cette technologie. »²

Un bel exemple illustrant la vérité de cette remarque est l'invention du laser par Townes. Presque rien de ce que les lasers font aujourd'hui n'avait été prévu avant qu'ils ne soient inventés. Les applications des biotechnologies démocratisées seront au moins aussi novatrices et variées que celles de la technologie laser. Les biotechnologies démocratisées commenceront par les jardins et les animaux domestiques, mais elles se diffuseront rapidement et infiltreront les activités minières et industrielles, les laboratoires et les supermarchés. Elles permettront à de nombreux objets du commerce et de la vie quotidienne, tels que les tables, les chaises, les maisons, les routes, d'être cultivés plutôt que manufacturés. Lorsque les adolescents auront acquis autant d'aisance dans la langue des génomes qu'ils en ont aujourd'hui

² Cité dans Robert W. Cahn, « An Unusual Nobel Prize », *Notes and Records of the Royal Society*, vol. 59, 2005, p. 150.

dans celle des blogs, ils mettront au point et feront pousser toutes sortes d'objets pour le plaisir et pour le profit.

Je ne m'aventurerai pas à prédire quelles révolutions scientifiques émergeront de la maîtrise des biotechnologies. L'un des cauchemars que je peux imaginer est que des chercheurs en médecine découvrent un moyen d'empêcher la mort. Après cela, des vieillards immortels s'accumuleraient sur le globe et il n'y aurait plus de place pour les jeunes. Le remplacement normal de chaque génération par la suivante toucherait à son terme, et le progrès de la science s'arrêterait. C'est une manière dont la technologie pourrait mettre un terme à la science. Une conséquence plus encourageante des biotechnologies est la mise au point et l'élevage de microbes, de plantes et d'animaux totalement nouveaux adaptés à la vie sauvage dans des lieux froids comme Mars ou les satellites de Jupiter et de Saturne. De nouveaux écosystèmes adaptés à de faibles niveaux de lumière solaire pourront amener ces mondes extraterrestres à la vie. Des plantes qui construiront leurs propres serres pourront produire de l'air respirable et maintenir la surface de ces mondes assez chaude pour pouvoir accueillir des établissements humains. De cette manière, de nouvelles générations de jeunes scientifiques pourraient garder la science en vie en des endroits lointains tout en réservant la planète Terre à une maison de retraite pour vieillards immortels.

Les logiciels open source

Heureusement, les jeunes scientifiques prospèrent encore ici, sur la planète Terre. J'en ai rencontré récemment un certain nombre à une réunion à Portland, en Oregon. Cette réunion informelle et agréable était baptisée OSCON, le sigle pour *Open Source Convention*. C'était une réunion organisée par un groupe de gens qui s'appellent eux-mêmes la culture *geek*, littéralement « débile ». Un grand nombre d'entre eux sont des gens qui ont quitté le lycée pour créer des entreprises de logiciels. Il y avait environ un millier de *geeks* à cette réunion, la plupart jeunes et audacieux, et pas seulement préoccupés de devenir riches. L'un de ceux que j'y ai connus était Brewster Kahle, le

créateur d'une entreprise appelée Internet Archive. Son but est de mettre toute la littérature du monde, dans toutes les langues, en mémoire numérique et de la rendre accessible à tous. Il a déjà commencé avec trois bases de données, l'une à San Francisco, l'autre à Amsterdam et la troisième à Alexandrie sur le site de l'ancienne bibliothèque. Il a l'intention d'avoir deux autres bases de données en Inde et en Chine. Chacune de ces bases contiendra une copie de la totalité des archives, de sorte que l'héritage de la littérature mondiale survivra même si quatre bases sur les cinq sont mal entretenues ou détruites. Les archives représenteront une centaine de millions de livres, ou quelques millions de gigabytes de données. Compte tenu du stockage de mémoire actuel, ces archives peuvent être hébergées dans un espace de taille modeste et coûtent beaucoup moins qu'une grande bibliothèque traditionnelle.

Kahle et toute la bande de l'OSCON partagent la foi en des logiciels *open source* (littéralement, « source ouverte »). Cela signifie que leurs entreprises sont fondées sur des programmes de logiciels libres de droits tels que Unix ou Linux, que chacun peut librement copier et améliorer. Ils partagent une profonde antipathie à l'égard des compagnies telles que Microsoft qui conservent leur code source secret. Ils font observer que les logiciels dont Bill Gates est le propriétaire sont remplis de bogues. Leur logiciel *open source* a moins de bogues parce que chaque utilisateur a le droit de le déboguer, et y est encouragé. La philosophie de l'*open source* est fondée sur le partage. Le moyen d'obtenir des logiciels sans bogues et conviviaux est de partager la propriété intellectuelle librement. Dans la communauté *open source*, les gens peuvent profiter des succès des autres et éviter leurs erreurs.

Je ne suis pas expert en logiciels *open source*. J'ai parlé à Portland du lien que j'ai vu entre le mouvement *open source* dans le monde des logiciels et le mouvement *open genome* dans le monde biologique. De même que l'industrie des logiciels est partagée entre l'*open source*, d'un côté, et Bill Gates, de l'autre, le monde des biotechnologies est divisé entre, d'un côté, la communauté internationale de recherche qui croit aux bases de données ouvertes et, de l'autre côté, Craig Venter et William

Hazeltine. Ces derniers ont créé des entreprises, respectivement Celera Genomics et Human Genome Sciences, qui gagnent de l'argent en vendant l'accès à des bases de données génomiques qu'ils possèdent à titre privé. Ces deux compagnies ont réalisé d'importants investissements dans la recherche et ont publié une grande partie de leurs découvertes. Mais elles restent fondamentalement engagées dans le caractère privé de la propriété intellectuelle. Tout comme Bill Gates, elles se considèrent comme des philanthropes. Elles ne donnent pas pourtant la poule aux œufs d'or.

J'ai parlé au public de l'*open source* d'un autre type de partage biologique. En plus de partager les bases de données génomiques, les communautés biologiques peuvent également partager des gènes. Ce partage physique des gènes entre différents membres d'une communauté donne un autre sens à l'expression *open source*. Lorsque les gènes sont partagés librement, une communauté biologique en tire les mêmes avantages que ceux que la communauté *open source* tire du partage des logiciels. J'ai suggéré que ce mouvement *open source* pourrait récapituler en quelques décennies toute l'histoire de la Terre pendant des milliards d'années.

Une nouvelle biologie pour un nouveau siècle

Carl Woese est le plus grand expert au monde dans le domaine de la taxonomie microbienne, de la classification et de la compréhension des microbes. Il a recherché les ancêtres des microbes en examinant les similitudes et les différences entre leurs génomes. Il a découvert la structure globale de l'arbre de la vie, dans lequel tous les êtres vivants descendent de trois branches primitives qu'il a appelées Bactéries, Archées et Eucaryotes. Il a récemment publié un article provocateur et éclairant sous le titre "Une nouvelle biologie pour un nouveau siècle" dans le numéro de juin 2004 de la revue *Microbiology and Molecular Biology Reviews*. L'idée principale de Woese est que la biologie réductionniste telle qu'elle est pratiquée depuis une centaine d'années est obsolète et que l'on a besoin d'une nouvelle biologie synthétique fondée sur les caractères d'organisation émergents plutôt que sur des gènes et des

molécules. En plus de ce thème principal, il soulève une autre question importante : quand l'évolution darwinienne a-t-elle commencé ? Par évolution darwinienne, il entend l'évolution telle que Darwin la concevait, c'est-à-dire fondée sur la compétition pour la survie d'espèces non interfécondes. Il apporte la preuve que l'évolution darwinienne ne remonte pas au commencement de la vie. Lorsque l'on compare des génomes de lignées anciennes d'êtres vivants, on trouve des preuves de transferts massifs d'information génétique d'une lignée à l'autre. Au cours des époques anciennes, le transfert génétique horizontal, le partage de gènes entre des espèces non apparentées, était prédominant. Et il l'est d'autant plus que l'on remonte plus loin dans le temps.

Tout ce qu'écrivait Carl Woese, même sur un mode spéculatif, doit être pris au sérieux. Dans son article sur la « nouvelle biologie », il postule un âge d'or de la vie pré-darwinienne, lorsque le transfert génétique horizontal était universel et que les espèces séparées n'existaient pas. La vie était alors une communauté de cellules de divers types, partageant leur information génétique de sorte que des dispositifs chimiques astucieux ou des processus catalytiques inventés par une créature pouvaient être hérités par toutes les autres. L'évolution était une affaire commune, l'ensemble de la communauté progressant en efficacité métabolique et reproductive à mesure que les gènes des cellules les plus efficaces étaient partagés. L'évolution pouvait être rapide, puisque les nouveaux dispositifs chimiques pouvaient être élaborés en même temps par des cellules de différents types travaillant en parallèle, et réunis ensuite dans une même cellule par transfert génétique horizontal. Mais ensuite, un jour fatidique, une cellule ressemblant à une bactérie primitive s'est trouvée en avance d'une étape sur ses voisines en efficacité. Cette cellule, anticipant Bill Gates de trois milliards d'années, s'est séparée de la communauté et a refusé de partager. Sa descendance est devenue la première espèce de bactérie, réservant sa propriété intellectuelle à son propre usage. Avec leur efficacité supérieure, les bactéries ont continué à prospérer et à évoluer séparément, tandis que le reste de la communauté poursuivait sa vie commune. Quelques millions d'années plus tard, une autre cellule s'est séparée de la communauté et est devenue l'ancêtre des archées. Quelque temps après, une troisième

cellule s'est séparée et est devenue l'ancêtre des eucaryotes. Et ainsi de suite, jusqu'à ce qu'il ne reste plus rien à la communauté et que la vie soit entièrement divisée en espèces. L'intermède darwinien avait commencé.

Cet intermède darwinien a duré deux ou trois milliards d'années. Il a probablement ralenti considérablement le rythme de l'évolution. La machinerie biochimique de base de la vie a évolué rapidement au cours des quelques centaines de millions d'années de l'ère pré-darwinienne et a très peu changé au cours des deux milliards d'années suivants d'évolution microbienne. L'évolution darwinienne est lente parce que les espèces individuelles une fois établies, elles évoluent très peu. L'évolution darwinienne nécessite que des espèces s'éteignent pour que de nouvelles espèces puissent les remplacer.

Aujourd'hui, après trois milliards d'années, l'intermède darwinien est terminé. C'était un intermède entre deux périodes de transfert génétique horizontal. L'ère de l'évolution darwinienne fondée sur la compétition entre espèces s'est achevée voici environ dix mille ans, lorsqu'une espèce, *Homo sapiens*, a commencé à dominer et à réorganiser la biosphère. Depuis ce moment, l'évolution culturelle a remplacé l'évolution biologique en tant que principal moteur des changements. L'évolution culturelle n'est pas darwinienne. Les cultures se diffusent par transfert horizontal des idées plus que par héritage génétique. L'évolution culturelle avance mille fois plus vite que l'évolution darwinienne et nous conduit vers une nouvelle ère d'interdépendance culturelle que nous appelons la globalisation. Et maintenant que l'*Homo sapiens* démocratise les nouvelles biotechnologies, on en revient à l'ancienne pratique pré-darwinienne du transfert génétique horizontal en transportant facilement des gènes des microbes vers les plantes et les animaux, en effaçant les frontières entre espèces. Nous entrons rapidement dans l'ère post-darwinienne, celle où les espèces n'existeront plus et où les règles du partage *open source* s'étendront de l'échange de logiciels à l'échange de gènes. Alors l'évolution de la vie redeviendra communautaire, comme elle l'était au

bon vieux temps, avant l'invention des espèces séparées et de la propriété intellectuelle.

Je voudrais emprunter à Carl Woese sa vision de l'avenir de la biologie et l'étendre à l'ensemble de la science. Voici sa métaphore pour le futur de la science :

« Imaginez un enfant jouant dans un ruisseau forestier, poussant un bâton dans un tourbillon du courant de manière à le perturber. Mais le tourbillon se reforme rapidement. L'enfant le détruit de nouveau. De nouveau il se reforme, et ce jeu fascinant continue. Eh bien voilà! Les organismes sont des formes persistantes dans un flux turbulent, dans un flux d'énergie... Il devient de plus en plus clair que pour comprendre les systèmes vivants de manière assez complète nous devons les voir non pas sur un mode matérialiste, comme des machines, mais comme des organisations stables, complexes et dynamiques. »

L'image des êtres vivants comme des formes d'organisation plutôt que comme des collections de molécules s'applique non seulement aux papillons et aux forêts tropicales, mais aussi aux orages et aux ouragans. L'univers non vivant est aussi divers et dynamique que l'univers vivant, et il est également dominé par des formes d'organisation qui ne sont pas encore comprises. La physique et la biologie moléculaire réductionnistes du XX^e siècle continueront à être importantes au XXI^e, mais elles ne seront plus dominantes. On ne peut pas résoudre les grands problèmes, l'évolution de l'univers dans son ensemble, l'origine de la vie, la nature de la conscience humaine et l'évolution du climat terrestre, en les réduisant à des particules élémentaires et à des molécules. De nouveaux modes de pensée et de nouveaux moyens d'organisation des grandes bases de données seront nécessaires.

Technologie verte

La démocratisation des biotechnologies peut également nous aider à résoudre des problèmes pratiques d'ordre économique ou environnemental. Une fois qu'une nouvelle génération d'enfants aura grandi et que les jeux biotechnologiques leur seront aussi familiers que les jeux informatiques le sont aujourd'hui à nos petits- enfants, les

biotechnologies ne leur sembleront plus bizarres et étrangères. A l'ère de la biologie *open source*, la magie des gènes sera accessible à tous ceux qui auront l'habileté et l'imagination pour l'utiliser. La voie sera ouverte pour que les biotechnologies entrent dans le flux général du développement économique et nous aident à résoudre quelques-uns de nos problèmes sociaux urgents et à améliorer la condition humaine sur toute la terre. La biologie *open source* pourrait être un outil puissant et nous donner accès à une énergie solaire abondante et bon marché.

Une plante est une créature qui utilise l'énergie de la lumière solaire pour transformer l'eau, le dioxyde de carbone et d'autres substances chimiques simples en racines, en feuilles et en fleurs. Pour vivre, elle a besoin de collecter la lumière solaire, mais elle l'utilise avec une faible efficacité. Les plantes cultivées les plus efficaces, comme la canne à sucre ou le maïs, convertissent environ un pour cent de la lumière qu'elles reçoivent en énergie chimique. Des collecteurs solaires artificiels en silicium peuvent faire beaucoup mieux. Des cellules solaires en silicium peuvent convertir la lumière du soleil en énergie électrique avec une efficacité de quinze pour cent, et l'énergie électrique peut être convertie en énergie chimique sans perte importante. On peut imaginer que dans l'avenir, lorsque nous maîtriserons l'art des plantes génétiquement transformées, nous pourrions faire pousser de nouvelles plantes alimentaires qui auraient des feuilles en silicium, qui convertiraient la lumière solaire en énergie chimique avec une efficacité dix fois supérieure à celle des plantes naturelles. Ces plantes alimentaires artificielles réduiraient la surface nécessaire à la production de biomasse d'un facteur dix. Elles permettraient d'utiliser l'énergie solaire à grande échelle sans occuper trop d'espace. Elles ressembleraient à des plantes naturelles, si ce n'est que leurs feuilles seraient noires plutôt que vertes. Ce que je me demande, c'est combien de temps cela nous prendrait de faire pousser des plantes à feuilles noires.

Si l'évolution naturelle des plantes avait été dirigée par la nécessité d'une grande efficacité d'utilisation de la lumière solaire, alors les feuilles de toutes les plantes auraient été noires. Evidemment l'évolution a été dirigée par d'autres nécessités, et en particulier par celle d'une protection

contre la surchauffe. Pour une plante qui pousse dans un climat chaud, il est avantageux de réfléchir autant que possible la lumière solaire qui n'est pas utilisée pour la croissance. Il y a énormément de lumière solaire, et il n'est pas important de l'utiliser avec une efficacité maximale. Les plantes ont évolué avec de la chlorophylle dans leurs feuilles pour absorber les composantes rouge et bleue de la lumière solaire et pour réfléchir le vert. C'est pourquoi il est raisonnable d'être vertes pour des plantes de climat tropical. Mais cette logique n'explique pas pourquoi les plantes des climats froids, où la lumière est rare, sont également vertes. On pourrait imaginer que dans des endroits tels que l'Alaska ou l'Islande la surchauffe ne soit pas un problème et que des plantes à feuilles noires utilisant plus efficacement la lumière solaire aient un avantage évolutif. Pour certaines raisons que nous ne comprenons pas, les plantes naturelles à feuilles noires ne sont jamais apparues. Pourquoi ? Peut-être ne comprendrons-nous pas pourquoi la nature n'a pas suivi cette voie avant de l'avoir suivie nous-mêmes.

Après avoir exploré cette voie jusqu'au bout, lorsque nous aurons créé de nouvelles forêts de plantes à feuilles noires pouvant utiliser la lumière solaire dix fois plus efficacement que les plantes naturelles, nous serons confrontés à une nouvelle série de problèmes environnementaux. Qui sera autorisé à cultiver des plantes à feuilles noires ? Ces plantes resteront-elles des cultivars perpétués artificiellement, ou bien envahiront-elles et transformeront-elles de manière permanente l'écologie naturelle ? Que ferons-nous des déchets de silicium que ces plantes laisseront derrière elles ? Serons-nous en mesure de mettre au point un écosystème complet de microbes se nourrissant de silicium, de champignons et de vers de terre pour mettre les plantes à feuilles noires en équilibre avec le reste de la nature et recycler leur silicium ? Le XXI^e siècle nous apportera de nouveaux outils puissants en génie génétique avec lesquels nous manipulerons nos fermes et nos forêts. Avec ces nouveaux outils viendront de nouvelles questions et de nouvelles responsabilités.

La pauvreté des campagnes est l'un des plus grands fléaux du monde moderne. Le manque de travail et de perspectives économiques dans les

villages conduit des millions de personnes à migrer vers des villes surpeuplées. Cette migration continue provoque d'énormes problèmes sociaux et environnementaux dans les grandes villes des pays pauvres. Les effets de la pauvreté sont les plus visibles dans les villes, mais ses causes résident principalement dans les villages. Une technologie qui créerait des industries et des emplois dans les villages pourrait donner aux villageois une autre solution que la migration. Cela leur donnerait une chance de survivre et de prospérer sans se déraciner.

Les variations de la balance des richesses et de la population entre les villes et les villages sont l'un des principaux thèmes de l'histoire humaine au cours des dix mille dernières années. Les déplacements des villages aux villes sont étroitement corrélés au passage d'un type de technologie à un autre. Par commodité, je qualifierai ces deux types, respectivement, de vert et de gris. Divers mouvements politiques se sont approprié l'adjectif « vert » et en ont abusé, particulièrement en Europe, et je dois donc expliquer clairement ce que j'ai à l'esprit lorsque je parle de « vert » et de « gris ». La technologie verte est fondée sur la biologie, la technologie grise sur la physique et la chimie. *Grosso modo*, la technologie verte est celle qui a donné naissance aux communautés villageoises voici dix mille ans, avec la domestication des plantes et des animaux, l'invention de l'agriculture, l'élevage des chèvres, des moutons, des chevaux, des vaches et des porcs, la fabrication de textiles, de fromage et de vin. La technologie grise est celle qui a donné naissance aux villes et aux empires cinq mille ans plus tard, avec le travail du bronze et du fer, l'invention de véhicules à roues et de routes pavées, la construction de bateaux et de chars de guerre, la fabrication d'épées, de pistolets et de bombes. Pendant les cinq mille premières années, la richesse et le pouvoir ont appartenu aux villages dotés de la technologie verte, et pendant les cinq mille autres ils ont appartenu aux villes dotées de la technologie grise. Depuis environ cinq cents ans, la technologie grise est devenue de plus en plus dominante, à mesure que nous avons appris à construire des machines qui utilisent la puissance du vent et de l'eau, de la vapeur et de l'électricité. Au cours des cent dernières années, avec l'accélération de la technologie grise, la richesse et le pouvoir ont été encore plus fortement concentrés dans les

villes. Plus les villes sont devenues riches, plus la pauvreté des campagnes s'est accrue.

Cette esquisse des dix mille dernières années de l'histoire humaine offre un nouveau point de vue sur le problème de la pauvreté rurale. Si cette dernière est une conséquence de la croissance non équilibrée de la technologie grise, il est possible qu'un retour de la balance du gris vers le vert la fasse disparaître. C'est mon rêve. Au cours des cinquante dernières années, nous avons assisté à une explosion du progrès dans la compréhension des processus fondamentaux de la vie, et au cours des vingt dernières cette nouvelle compréhension a donné lieu à une explosion de croissance de la technologie verte. Cette nouvelle technologie verte nous permet d'élever de nouvelles variétés d'animaux et de plantes, comme l'ont fait nos ancêtres il y a dix mille ans, mais cent fois plus vite; il faut désormais une décennie et non plus un millénaire pour créer une nouvelle plante alimentaire. Guidés par une compréhension précise des gènes et des génomes plutôt que par des essais et des erreurs, nous pouvons modifier des plantes en l'espace de quelques années de manière à leur donner un meilleur rendement, une meilleure valeur nutritive ou une meilleure résistance aux insectes nuisibles et aux maladies.

Avec quelques décennies de plus, dès lors que la poursuite de l'exploration des génomes nous donnera une meilleure connaissance de l'architecture des créatures vivantes, nous pourrons mettre au point de nouvelles espèces de microbes et de plantes adaptées à nos besoins. La voie sera alors libre pour que la technologie verte fasse moins cher et plus proprement un grand nombre de choses que peut faire la technologie grise, mais aussi des choses que la technologie grise ne peut pas faire. La technologie verte pourrait remplacer la plupart de nos industries chimiques existantes et une grande partie de nos industries minières et manufacturières. Elle pourrait réaliser un recyclage à plus grande échelle des déchets et des machines usées, avec un grand avantage pour l'environnement. Un système économique fondé sur la technologie verte pourrait s'approcher de près de l'objectif de développement durable puisqu'il utiliserait la lumière solaire plutôt que les carburants fossiles

comme source primaire d'énergie. De nouvelles espèces de termites pourraient être élaborées qui mâcheraient les voitures abandonnées plutôt que les maisons, et de nouvelles espèces d'arbres pourraient être mises au point pour transformer le dioxyde de carbone et la lumière solaire en carburants liquides plutôt qu'en cellulose.

Avant que l'on n'autorise des termites et des arbres génétiquement modifiés à nous aider à résoudre nos problèmes économiques et environnementaux, de vifs débats feront rage sur les dommages possibles qu'ils pourraient causer. Beaucoup de gens qui se qualifient de « verts » sont passionnément opposés à la technologie verte. Mais, en définitive, si la technologie est mise au point avec précaution et en respectant la sensibilité humaine, elle sera probablement acceptée par la plupart des gens qui seront concernés par elle, de même que les technologies vertes, tout aussi artificielles et étrangères, des vaches laitières, du labourage et de la fermentation du raisin ont été acceptées par nos ancêtres il y a longtemps. Je ne suis pas en train de dire que l'acceptation politique de la technologie verte sera rapide et facile. Je dis simplement que la technologie verte est pleine de promesses pour la préservation de l'équilibre naturel sur cette planète, de même que pour soulager la misère humaine. Les générations futures, élevées dès l'enfance avec des jeux « *biotech* », l'accepteront probablement avec beaucoup plus de facilité que nous. Personne ne peut prédire combien de temps cela pourrait prendre de tester la nouvelle technologie de mille manières différentes et de mesurer ses coûts et ses bénéfices.

Quel est le rapport entre ce rêve d'un nouvel essor de la technologie verte et le problème de la pauvreté des campagnes ? Dans le passé, la technologie verte a toujours été rurale, se situant dans les fermes et les villages plutôt que dans les villes. Dans l'avenir elle envahira les villes aussi bien que les campagnes, les usines aussi bien que les forêts. Elle ne sera pas entièrement rurale, mais elle aura encore une importante composante rurale. Après tout, le clonage de Dolly a eu lieu dans une station d'élevage animalier en Ecosse, et non pas dans un laboratoire urbain de la Silicon Valley. La technologie verte utilisera la terre et la lumière du soleil comme sources primaires de matériaux bruts et

d'énergie. La terre et la lumière solaire ne peuvent être concentrées dans des villes mais sont répandues de façon plus ou moins homogène sur la planète. Lorsque les industries et les technologies seront fondées sur la terre et la lumière solaire, elles apporteront les emplois et la richesse aux populations rurales. Heureusement, la lumière du soleil est la plus abondante dans les pays tropicaux, où vit une large fraction de la population mondiale et où la pauvreté rurale est la plus grave. Etant donné que la lumière solaire est distribuée plus équitablement que le charbon et le pétrole, la technologie verte pourrait être un grand égalisateur qui nous aiderait à combler le fossé entre les pays riches et les pays pauvres.

Mon livre *Le Soleil, le Génome et Internet* (1999) donne une vision de la technologie verte qui enrichit les villages dans le monde entier et fait cesser les migrations des villages vers les mégalo-poles. Les trois composantes de cette vision sont toutes essentielles : le soleil pour procurer l'énergie là où l'on en a besoin, le génome pour produire des plantes capables de convertir efficacement et à faible coût la lumière solaire en carburants chimiques, l'Internet pour mettre un terme à l'isolement intellectuel et économique des populations rurales. Si toutes ces composantes étaient en place, chaque village d'Afrique pourrait profiter de la part qui lui revient des bienfaits de la civilisation. Les gens qui préfèrent vivre dans des villes seraient toujours libres de partir de leur village pour s'y rendre, mais ils n'y seraient pas contraints par des nécessités économiques.

La loi de Moore en biologie

Il y a deux types de physiciens qui mettent un pied en biologie. Certains d'entre eux sont arrogants et d'autres sont modestes. Les physiciens arrogants disent que la biologie a besoin de meilleurs concepts et que, puisque les physiciens sont bons en concepts, leur tâche est de dire aux biologistes comment ils doivent penser. Les physiciens modestes disent que la biologie a besoin de meilleures machines et que, comme les physiciens sont bons en machines, leur tâche est d'inventer de nouveaux outils que les biologistes pourront

utiliser. Les physiciens qui inventent de nouveaux outils ont eu le plus grand impact. Ils ont inventé le microscope optique à contraste de phase, le microscope électronique, l'imagerie par diffraction des rayons X et par résonance magnétique, en plus des ordinateurs qui servent à tout le monde et que les biologistes utilisent comme les physiciens pour enregistrer et interpréter les données expérimentales.

Parmi tous les outils créés par des physiciens avec la technologie grise, celle qui a connu le succès le plus spectaculaire est le circuit intégré, une petite pastille de silicium avec un extraordinaire réseau de circuits électroniques gravés à sa surface. Depuis quarante ans, la performance des circuits intégrés a augmenté avec le temps, conformément à la loi de Moore. Cette dernière dit que leur rapidité double tous les dix-huit mois, ou bien augmente d'un facteur cent tous les dix ans, sans grande augmentation du coût. Les ordinateurs d'aujourd'hui peuvent réaliser à peu près cent millions de fois plus d'opérations par seconde qu'ils ne le pouvaient quand Moore a formulé sa loi il y a quarante ans, tandis que le coût d'un ordinateur est resté pratiquement constant.

La loi de Moore est parfois vraie aussi pour les produits de la technologie verte. Considérons par exemple l'un des outils centraux de cette technologie verte, le séquençage de l'ADN. Fred Sanger a séquencé le premier génome viral complet de cinq mille paires de bases en 1977, et le génome humain, avec ses trois milliards de paires de bases, a été séquencé trente-cinq ans plus tard. Le rendement en paires de bases a suivi la loi de Moore, mais ce n'est pas le cas du coût du séquençage. Le génome humain coûte considérablement plus que le génome viral. Les machines à séquencer qui existent maintenant sont des merveilles d'ingéniosité, mais elles sont encombrantes et chères. Elles traitent l'ADN en vrac, en utilisant les méthodes de la chimie en phase liquide. Les réactifs chimiques coûtent autant que les machines. Ce dont la biologie a besoin désormais, c'est d'un séquenceur unimoléculaire qui puisse traiter une molécule à la fois et la séquencer par des méthodes physiques plutôt que chimiques. Inventer une telle machine est un travail pour des physiciens, qui emploieront la technologie grise comme

outil pour aider la technologie verte. Qui que ce soit qui l'invente et qui la rende fiable, il apportera une contribution majeure à la biologie.

Un séquenceur unimoléculaire serait beaucoup moins cher et beaucoup plus rapide que les séquenceurs existants. Il pourrait être aussi petit et aussi commode qu'un ordinateur portable, il ouvrirait une molécule d'ADN aussi rapidement que l'enzyme polymérase qui convertit un simple brin d'ADN en double brin, et il enregistrerait les paires de bases dans la mémoire d'un ordinateur à la vitesse de mille par secondes. A cette vitesse, une seule machine pourrait lire le génome humain complet en un mois. Avec beaucoup de travail et un peu de chance, nous mettrons au point des séquenceurs unimoléculaires qui prolongeront la loi de Moore dans le futur en augmentant la vitesse de séquençage et en diminuant le coût unitaire d'un facteur cent à chaque décennie.

Qu'est-ce que cela signifiera pour la technologie verte ? Jusqu'à maintenant nous avons séquencé les génomes d'environ une centaine d'espèces, des microbes pour la plupart, pour un total d'environ dix milliards de paires de bases. La biosphère de notre planète comprend environ dix millions d'espèces, et leurs génomes contiennent en tout à peu près dix millions de milliards de paires de bases. Dans le langage de l'informatique, les génomes de toutes les espèces de la Terre s'élèvent à quelques millions de giga- bytes de données. Ce serait une base de données comparable en taille aux autres bases de données déjà existantes. Nous savons déjà comment stocker des bases de données de cette taille et comment nous y retrouver. Mais avant de pouvoir séquencer ces génomes, il faut explorer la biosphère et identifier les espèces. Si la loi de Moore reste valide pour le séquençage de l'ADN, nous pourrions séquencer la totalité de la biosphère en trente ans environ, pour un coût à peine plus grand que celui du génome humain. Le projet génome de la biosphère nous permettra de commencer à comprendre intimement la biosphère, de même que le projet génome humain nous a permis de commencer à comprendre intimement la biologie humaine. Le séquençage de dix millions d'espèces sera un bon début, à la fois pour comprendre et pour préserver la biosphère. Si nous comprenons ce qui s'y trouve, nous aurons de meilleures chances de la préserver.

Les origines de la vie

La conception de la vie selon Carl Woese comme un processus dynamique plutôt qu'un amas statique de molécules donne un nouvel éclairage à un vieux mystère, les origines de la vie. Un indice important, pour la compréhension de ce mystère, est la double nature de la vie telle qu'elle existe actuellement, avec ses deux composants, les protéines et les acides nucléiques, qui évoquent la symbiose de deux espèces étrangères. Les protéines régissent le métabolisme des cellules actuelles et les acides nucléiques contrôlent leur réplication. Les protéines sont de petits ouvriers très actifs qui filent sans cesse à travers la cellule et prennent en charge les actions nécessaires pour maintenir la cellule en bon état. Les acides nucléiques sont les manuels d'instruction permanents qui disent à la cellule comment se copier fidèlement elle-même lorsqu'elle produit des descendants. On ne sait pas lequel de ces composants est venu en premier.

D'après le dogme dominant parmi les biologistes, ce sont les acides nucléiques qui sont apparus en premier. Selon ce dogme, il y a eu un « monde de l'ARN » avec des créatures composées d'arn, un acide nucléique semblable à l'ADN, avant qu'il n'y ait des créatures composées de protéines. Ce dogme a été très fortement appuyé lorsqu'on a déterminé la structure des ribosomes. Ces derniers sont les usines chimiques dans lesquelles les protéines sont fabriquées dans toutes les cellules actuelles, en utilisant les instructions fournies par les acides nucléiques. Grâce à la découverte récente de la structure des ribosomes, nous savons désormais que leur armature centrale est faite d'arn. Puisque les ribosomes sont probablement les plus vieilles reliques survivantes des formes de vie ancestrales, le fait qu'ils soient composés d'arn renforce l'idée que l'ARN est venu en premier. Le principal élément en défaveur de cette idée est le fait que l'ARN est chimiquement instable et difficile à synthétiser dans un environnement prébiotique.

Un autre élément clé dans la recherche de l'origine de la vie est l'adénosine triphosphate (ATP). Cette molécule est un lien essentiel entre les deux composants des cellules vivantes. L'ATP joue un rôle universel de transporteur d'énergie chimique dans le métabolisme des

cellules actuelles, et elle est facilement transformée en un élément de construction d'acides nucléiques. La question est, dès lors, de savoir lequel des deux rôles de l'ATP est venu en premier. Ma réponse à cette question est à nouveau qu'il faut écouter les chimistes. Ceux-ci nous disent que l'ATP, de même que les acides nucléiques auxquels elle est apparentée, est chimiquement instable et difficile à synthétiser sans un appareil métabolique préexistant. Je considère donc que le plus probable est que l'appareil métabolique des cellules primitives est venu en premier. J'appelle cette idée le « modèle du sac poubelle » de l'origine de la vie, avec des cellules primitives qui contiennent un mélange aléatoire de substances chimiques organiques, des cellules qui grandissent et se divisent en deux de temps en temps mais ne se répliquent pas précisément. Dans cette histoire, l'ATP est apparue dans des cellules « sac poubelle » préexistantes, comme un auxiliaire utile pour leur machinerie biochimique. Ensuite, à un stade ultérieur de l'évolution, les éléments de construction dérivés de l'ATP ont commencé à s'assembler en acides nucléiques et à acquérir leur capacité de répllication exacte. L'auto-répllication de l'ARN est devenue une nouvelle forme de vie parasitaire évoluant à l'intérieur des cellules préexistantes. Et ensuite, après un certain temps, le parasite est devenu un symbionte ³, et la vie telle que nous la connaissons, avec sa structure double, a pu apparaître.

Cette histoire d'acides nucléiques évoluant comme des parasites à l'intérieur d'une génération de cellules plus anciennes est une pure conjecture. Je ne prétends pas qu'elle est vraie. Je dis seulement que c'est une hypothèse de travail utile pour expliquer la nature double de la vie. La vérité se révélera certainement plus complexe. Une conséquence de cette hypothèse est que la phase parasitaire primitive de l'évolution des acides nucléiques était en fait le « monde de l'ARN ». Celui-ci existait à l'intérieur des cellules préexistantes. Dans ce monde de l'ARN, l'ARN a utilisé sa capacité de répllication pour mettre au point une machinerie chimique beaucoup plus élaborée et précise que celle qui existait auparavant dans les cellules primitives qui l'hébergaient. Au cours de

³ On désigne ainsi chacun des êtres vivants qui prennent part à une symbiose.

cette phase parasitaire, l'ARN était tout seul, découplé de l'appareil métabolique de la cellule. Au cours de cette phase, l'ARN a développé sa propre machinerie métabolique d'enzymes à ARN et d'autres molécules catalytiques, aboutissant à l'apparition des ribosomes. Ensuite ces derniers ont donné à l'ARN le pouvoir de synthétiser des protéines, les protéines ont pris en charge l'organisation de la cellule, l'appareil des acides nucléiques et celui des protéines se sont associés et le monde de l'ARN est arrivé à son terme.

Pour obtenir des éléments pour ou contre cette histoire hypothétique des origines de la vie, une bonne stratégie serait d'explorer l'archéologie du ribosome. Les ribosomes des différentes espèces sont tous cousins, mais il y en a de nombreuses variétés différentes. Ils sont indéniablement anciens, et leurs points communs et leurs différences donneront des informations précises sur l'environnement chimique à l'époque où le monde de l'ARN touchait à sa fin. Peut-être, lorsque les preuves enfouies dans les structures et les fonctions des différentes lignées de ribosomes auront été déchiffrées, cela nous indiquera-t-il s'ils ont évolué à l'intérieur de cellules préexistantes, ou comme des structures indépendantes et vivant séparément.

L'image de Woese de l'enfant poussant un bâton dans un tourbillon, sa représentation de la vie comme une forme persistante dans un flux turbulent, est particulièrement utile quand on réfléchit aux origines de la vie. Depuis le début, la vie est dynamique plutôt que statique. Si l'on regarde deux composants de n'importe quelle cellule vivante actuelle, on voit un assemblage dynamique de protéines et de molécules plus petites assurant un assemblage, statique en comparaison, d'acides nucléiques. Puisque je trouve la représentation de la vie par Woese convaincante, j'estime naturel de considérer que les éléments dynamiques de la vie sont venus en premier, les éléments statiques en second. Cela signifie que le métabolisme est venu en premier, la réplication exacte en second. Si cette représentation des origines de la vie est correcte, alors il y a bien eu un monde de l'ARN, mais le monde des cellules primitives à métabolismes essentiellement aléatoires est venu en premier, le monde de l'ARN en

deuxième, et le monde moderne de la vie avec un métabolisme lié à la réplication est venu en troisième.

Freeman J. Dyson (1923-2020).
Professeur émérite de physique à l'Institute for Advanced Study
de l'université de Princeton.

Freeman J. Dyson, "Our Biotech Future",
The New York Review of Books, vol. 54, n°12, 19 juin 2007.

Traduit de l'anglais par Stéphane Schmitt.

Cet article est repris dans le livre
La Vie dans l'Univers. Réflexions d'un physicien,
Paris, Gallimard, 2009.

Commentaire de Wendell Berry

La science est précieuse et admirable pour sa capacité à établir un certain type de vérité au-delà de tout doute raisonnable, pour ses méthodologies précises et son respect des preuves. Il est donc déconcertant de voir un éminent scientifique tel que Freeman Dyson utiliser son prestige et celui de la science comme une chaire pour prédire l'avènement d'une nouvelle panacée technologique.

Dans son essai intitulé "Our Biotech Future", M. Dyson voit la haute technologie « aller de triomphe en triomphe avec l'avènement des ordinateurs personnels, des GPS et des appareils photo numériques », et il prédit l'avènement d'une biotechnologie « domestiquée » qui deviendra le jouet et la forme d'art des « femmes au foyer et des enfants », qui « nous donnera une explosion de diversité de nouvelles créatures vivantes, plutôt que les monocultures que préfèrent les grandes entreprises », et qui résoudra « le problème de la pauvreté rurale ».

Bien entendu, il ne s'agit là que d'un élément supplémentaire d'une longue liste de panacées techno-scientifiques qui comprend l'industrialisation de pratiquement tout pour « économiser de la main-d'œuvre », l'eugénisme (le spectre qui hante le génie génétique), la chimie (pour « vivre mieux »), l'« atome pour la paix », la révolution verte, la télévision, le programme spatial et les ordinateurs. Tous ces éléments ont été présentés, par des prophètes tels M. Dyson, comme des avantages essentiellement sans coûts, des actifs sans débits, malgré leur prélèvement sur les ressources matérielles et culturelles nécessaires. De telles prophéties ne sont en fait que des discours de vente - et des discours de vente, de surcroît, par des vendeurs qui ne sont soumis à aucune pression pour garantir leurs produits.

M. Dyson a la franchise d'admettre que les jeux biotechnologiques pour enfants peuvent être dangereux : « Les dangers de la biotechnologie sont réels et sérieux ». Et il énumère un certain nombre de questions -

sérieuses, cela va de soi - auxquelles « il faut répondre ». Mais ce qui est peut-être le plus irresponsable dans son essai, c'est sa volonté d'éluder ses propres questions : « Je ne tente pas de répondre à ces questions ici. Je laisse à nos enfants et petits-enfants le soin de fournir les réponses ». Cette attitude est tout à fait conforme au fait que nous léguons à nos enfants d'énormes accumulations de déchets nucléaires et de poisons chimiques. Et n'est-ce pas plutôt choquant de ne pas être scientifique ? Si la génétique a un sens, comment pouvons-nous supposer que nos enfants et petits-enfants seront suffisamment intelligents pour répondre aux questions auxquelles nous sommes trop ennuyés ou paresseux pour répondre ? Et après notre longue expérience des problèmes causés par les solutions industrielles, un peu de scepticisme ne serait-il pas de mise ? N'y aurait-il pas lieu, en fait, de procéder à une véritable comptabilité analytique ?

Quant à la pauvreté rurale, la pensée de M. Dyson n'est que trop familière à tout Américain rural : « Ce dont le monde a besoin, c'est d'une technologie qui s'attaque directement au problème de la pauvreté rurale en créant de la richesse et des emplois dans les villages. » Cela s'appelle « faire venir l'industrie », une pratique chère aux politiciens d'État. Pour faire venir l'industrie, l'État offre des « incitations économiques » (ou « aides aux entreprises ») et une main-d'œuvre bon marché aux bienfaiteurs présumés, qui partent souvent très vite pour des incitations plus importantes et une main-d'œuvre moins chère ailleurs.

La technologie industrielle, telle qu'elle est introduite dans l'industrie et appliquée par l'agro-industrie, a été jusqu'à présent le moyen le plus ingénieux de siphonner la richesse des campagnes – non pas vers les villes, comme semble le penser M. Dyson, car la pauvreté urbaine est inextricablement liée à la pauvreté rurale – mais vers les entreprises. Les industries qui sont « importées » font sortir la richesse locale, sinon elles ne viendraient pas. Et qu'est-ce qui permet de penser que la « technologie verte » serait une exception ? Comment M. Dyson peut-il supposer que les pauvres des zones rurales contrôleront le pouvoir de la biotechnologie afin de l'utiliser à leur propre avantage ? N'a-t-il pas entendu parler du brevetage des variétés et des gènes ? N'a-t-il pas entendu parler de l'infâme procès intenté par Monsanto à l'agriculteur

canadien Percy Schmeiser ? Je suppose que si, comme le prédit M. Dyson, la biotechnologie devient accessible – à peu de frais, je l’imagine – même aux enfants, alors elle sera accessible aux paysans pauvres. Mais quel en serait l’avantage économique ? Comment, en bref, cela permettrait-il de soulager la pauvreté ? M. Dyson ne le dit pas.

Son seul exemple de biotechnologie rurale est le clonage de la brebis Dolly. Mais il ne dit pas en quoi cet exploit a profité à la production ovine, et encore moins aux ruraux pauvres.

Wendell Berry,
Port Royal, Kentucky

Réponse de Freeman J. Dyson

Je remercie **Wendell Berry**, James Herman et Christopher Michael pour leurs commentaires éclairants. Comme d’habitude, j’apprends davantage des critiques que des flatteurs. J’apprécie particulièrement la critique de Berry parce qu’elle vient du Kentucky, un État que je ne connais que superficiellement depuis une visite au Center College de Danville, où j’étais l’invité du chapitre local des étudiants Phi Beta Kappa. À Danville, j’ai vu trois choses qui correspondent à ma vision de l’avenir : une interprétation de classe mondiale du Requiem de Verdi par une chorale locale, une librairie où les propriétaires savent et aiment ce qu’ils vendent, et une salle pleine d’étudiants brillants discutant de la science et de la technologie au milieu d’une société rurale.

Je suis conscient que Danville ne représente pas tout le Kentucky et que de grandes parties du Kentucky ne bénéficient pas des bienfaits de l’embourgeoisement. Mais je continue à considérer Danville comme un bon modèle pour l’avenir de la société rurale, lorsque les gens seront libérés du fardeau de l’agriculture de subsistance. Je ne prédis pas une « panacée technologique ». Je dis seulement que la science nous donnera bientôt une nouvelle série d’outils, qui pourraient apporter richesse et liberté à la campagne lorsqu’ils seront bon marché et

largement disponibles. Que nous accueillions ces nouveaux outils avec enthousiasme ou avec dégoût est une question de goût. Il serait injuste et peu judicieux que ceux qui n'aiment pas les nouveaux outils aujourd'hui imposent leurs goûts à nos petits-enfants demain. [...]

Commentaire et réponse publiées dans
The New York Review of Books, vol. 54, n°14, 27 juillet 2007.
<http://www.nybooks.com/issues/2007/09/27/>

Commentaire et réponse non publiés
dans le dossier de la revue *Le Débat*.

Nigel Goldenfeld,
Carl R. Woese

La prochaine révolution en biologie



L'un des traits les plus fondamentaux de la découverte scientifique est la révolution de la pensée qui accompagne l'acquisition d'un ensemble de données entièrement nouvelles. La nouvelle fenêtre sur l'univers qui s'est ouverte avec l'avènement de l'astronomie par satellite a anéanti les conceptions cosmologiques auxquelles nous étions le plus attachés, en particulier en ce qui concerne les dimensions, la dynamique et la composition de l'univers. De même, la conjonction de nouvelles idées théoriques en sciences de l'évolution et de l'avalanche annoncée de données génomiques environnementales, notamment chez les virus et les microbes marins, va modifier fondamentalement notre compréhension de la biosphère dans son ensemble, et probablement entraîner une révision de certaines notions aussi essentielles et aussi largement admises que celles d'espèce, d'organisme et d'évolution. Nous allons montrer ici pourquoi nous voyons une transformation si radicale se profiler à l'horizon, et dans quelle mesure les biologistes auront besoin de joindre leurs forces à celles des spécialistes de sciences quantitatives telles que la physique, afin de créer une biologie qui rende compte des phénomènes collectifs et qui supplante le réductionnisme moléculaire du XX^e siècle.

Le point de départ est la notion de transfert génétique horizontal (TGH) ¹, souvent présentée comme « l'empêcheur de tourner en rond » de la phylogénie moléculaire, en raison des déviations qu'elle suppose par rapport à l'image parfaitement structurée de l'évolution darwinienne, verticale. Au niveau microbien, le TGH représente une force omniprésente et incroyablement puissante, connue par exemple pour accélérer la diffusion de la résistance aux antibiotiques. La fréquence du TGH implique que la conception des microbes en tant qu'organismes régis par des caractéristiques individuelles ne constitue pas une bonne approximation, sauf peut-être dans le cadre stérile d'un laboratoire. En réalité, leurs communications, aussi bien au niveau génétique qu'à celui des réponses aux signaux (que l'on songe au *quorum sensing* ²), indiquent que le comportement microbien doit être compris comme étant essentiellement coopératif. A l'état sauvage (et il faut se rappeler qu'il n'y a peut-être qu'un pour cent environ des microbes qui peuvent être cultivés à l'heure actuelle), les microbes forment des communautés, investissent des niches biochimiques et prennent part aux cycles biogéochimiques à une échelle globale. Les études disponibles indiquent très clairement que les microbes absorbent des gènes et s'en débarrassent en fonction de leurs besoins, et en réponse à leur environnement. Ce n'est pas un spectre discontinu que l'on observe, mais un *continuum* de possibilités génomiques, ce qui jette un doute sur la validité du concept fondamental d'espèce étendu au monde microbien. Le défaut d'utilité du concept d'espèce est révélé par les incursions passionnantes qui ont été effectuées récemment dans le domaine de la métagénomique ; par exemple, les études sur la distribution spatiale des gènes de rhodopsine ³ observée dans les microbes marins sont en accord avec le concept de « gène

¹ Il s'agit de la transmission directe de gènes entre cellules, par opposition au transfert vertical, d'une génération à l'autre. [NdT]

² Le *quorum sensing* est un mécanisme de synchronisation de l'expression ou de la répression de certains gènes que l'on constate dans des populations bactériennes, et qui varie en fonction de leur densité : il implique que les bactéries puissent communiquer entre elles par des signaux moléculaires. [NdT]

³ La rhodopsine est un pigment rendant les cellules sensibles à la lumière. [NdT]

cosmopolite », qui se promène entre les bactéries ou les archéobactéries en fonction de ce que leur dictent les pressions environnementales.

Tout aussi passionnante est la prise de conscience croissante du fait que la virosphère⁴ joue un rôle absolument fondamental dans la biosphère, à la fois à court et à long terme, à une échelle évolutive. Des travaux récents suggèrent que les virus pourraient jouer un rôle important de stockage et de mémoire de l'information génétique d'une communauté, contribuant ainsi à la dynamique évolutive et à la stabilité du système. C'est ce qu'indique, par exemple, le déclenchement de l'induction environnementale du prophage⁵, au cours de laquelle des virus latents dans des cellules peuvent être activés par des influences de l'environnement. La destruction de la cellule et la réplication virale qui en résultent constituent un mécanisme efficace de dispersion des gènes du virus et de la cellule hôte.

Ce qui devient clair, c'est que les microorganismes possèdent une remarquable capacité à reconstruire leur génome face à des stress environnementaux catastrophiques et que, dans certains cas au moins, leurs interactions collectives avec la virosphère (et peut-être d'autres agents de transfert génique) pourraient être essentielles pour cela. Dans une telle situation, quelle est la validité du concept même d'organisme isolé ? Il semble qu'il y ait une continuité du flux énergétique, de la communication et du transfert d'information entre les cellules, la communauté, la virosphère et l'environnement. Si les interactions sont fortes et les effets collectifs dominants, alors un organisme ne peut pas même être considéré de manière isolée. En fait, nous pourrions aller jusqu'à suggérer qu'une caractéristique définissant la vie est sa forte dépendance à l'égard du flux en provenance de l'environnement, qu'il apporte de l'énergie, des substances chimiques ou des éléments métaboliques ou génétiques. Cette perspective, qui repose sur la biocomplexité, rend artificiels des débats tels que la question de savoir si un virus est vivant ou mort.

⁴ La partie de la biosphère qui correspond aux virus. [NdT]

⁵ Un prophage est un virus bactérien à l'état latent, intégré dans le génome de la bactérie. [NdT]

Les implications des phénomènes collectifs que permet le TGH ne sont nulle part aussi prégnantes et importantes que dans l'évolution elle-même. Un informaticien pourrait qualifier l'appareil traductionnel des cellules (qui sert à convertir l'information génétique en protéines) de système d'exploitation, grâce auquel toute innovation est communiquée et mise en œuvre. Le rôle fondamental joué par la traduction, illustré notamment par le code génétique, est révélé par l'optimisation de ce code, qui est bien documentée. Son rôle particulier dans toute forme de vie conduit inmanquablement à l'idée plutôt frappante selon laquelle la vie primitive a dû évoluer d'une manière fondamentalement lamarckienne, avec une descendance verticale rendue marginale par les formes primitives de TGH, qui étaient plus puissantes. Un tel perfectionnement progressif, par le partage horizontal d'innovations génétiques, aurait conduit à la production d'une explosion combinatoire de nouveauté génétique, jusqu'à ce que le niveau de complexité, correspondant peut-être à la multiplicité des niveaux de régulation, ait nécessité une transition vers l'époque actuelle d'évolution verticale. Par conséquent, nous considérons comme assez regrettable l'association que l'on fait habituellement entre le nom de Darwin et l'évolution, car il existe d'autres modalités qui doivent être envisagées et que nous estimons indispensables au cours de l'histoire évolutive.

Nous vivons une période extraordinaire pour la biologie, car les perspectives que nous avons évoquées la placent dans un contexte impliquant nécessairement d'autres disciplines, telles que la physique statistique, qui savent l'importance des phénomènes collectifs bien mieux que la biologie ne l'a su jusqu'à présent.

Les questions que soulèvent les flux d'énergie générique, d'information et de gènes auxquels nous avons fait allusion devront probablement être résolues dans l'esprit de la mécanique statistique et de la théorie des systèmes dynamiques. Avec le temps, l'approche actuelle de modélisation *post hoc* sera remplacée par un dialogue entre la prédiction quantitative et le test expérimental, dialogue qui est, de nos jours, plutôt caractéristique des sciences physiques.

Parfois, le langage exprime l'ignorance plutôt que la connaissance, comme c'est le cas de la dénomination « procaryote », désormais remplacée par les termes d'archéo-bactéries et de bactéries, qui sont déduits d'une phylogénie moléculaire précise et bien fondée. Nous prévoyons qu'en biologie de nouveaux concepts exigeront un nouveau langage, qui se constituera à partir des découvertes émergeant des données nouvelles que nous avons soulignées dans cet essai. Lors d'une révolution antérieure, Lavoisier faisait observer que le progrès scientifique, tout comme l'évolution elle-même, devait relever un défi de communication :

« On ne peut perfectionner le langage sans perfectionner la science, ni la science sans le langage. » ⁶

La biologie est sur le point d'affronter ce défi.

Nigel Goldenfeld, Carl R. Woese.

Nigel Goldenfeld et Carl R. Woese sont respectivement professeur de physique et professeur de microbiologie à l'université de l'Illinois de Urbana-Champaign.

Nigel Goldenfeld et Carl R. Woese,
"Biology's Next Revolution",
Nature, vol. 445, 2007.

Traduit de l'anglais par Stéphane Schmitt.

⁶ Antoine Laurent Lavoisier, *Traité élémentaire de chimie* [1789], in *Œuvres de Lavoisier*, éditées par J.-B. Dumas, E. Grimaux et F.-A. Fouqué, Paris, Imprimerie impériale, 1864, vol. 1, p. 2.

Evelyn Fox Keller

L'unification de la biologie et de la chimie

*La synthèse de la nouvelle biologie
de Carl R. Woese et de la nouvelle
chimie de Jean-Marie Lehn*



Lorsque Jacques Monod, d'abord en 1954, puis en 1961, déclara que « tout ce qui est vrai chez [la bactérie] *Escherichia coli* doit également l'être chez l'éléphant »¹, la formule avait pour but de provoquer. Son caractère choquant provenait précisément de ce que le bon sens biologique traditionnel attribuait à l'éléphant le statut d'organisme « supérieur », pas très différent de nous, tout en reléguant les bactéries en bas de l'échelle des êtres ou, dans des termes plus contemporains, dans la branche inférieure de l'arbre de la vie. De fait, affirmer que la bactérie, être inférieur et primitif, est un modèle pour tous les organismes était l'un des pas les plus audacieux accomplis par la première génération de biologistes moléculaires, et pour un temps cela s'avéra être, étrangement, une innovation astucieuse. Plus tard, bien sûr, lorsque l'attention des biologistes moléculaires se tourna vers les problèmes de l'embryologie, les limites d'*Escherichia coli* en tant qu'organisme modèle apparurent flagrantes, et des organismes tels que l'éléphant purent alors de nouveau recouvrer leur statut particulier, « supérieur ».

¹ Jacques Monod et François Jacob, "General Conclusions : Teleonomic Mechanisms in Cellular Metabolism, Growth and Differentiation", *Cold Spring Harbor Symposia on Quantitative Biology*, vol. 26, 1961, p. 393.

Aujourd'hui, cependant, les bactéries se trouvent une nouvelle fois à la pointe de la biologie, bien que cette fois elles se présentent non pas tant comme des modèles pour les organismes supérieurs que comme des exemples de tours de force biologiques absents du répertoire d'une grande part, voire de la majorité des organismes supérieurs. On a beaucoup travaillé au cours des dernières années sur les modes de comportement coopératifs apparemment propres aux bactéries, sur leur capacité à produire de nouveaux types de compétence en s'auto-organisant en des collectivités complexes, sur leurs capacités exclusives de traitement de l'information qui conduisent certains à parler d'une « cognition » et d'une « intelligence » bactériennes.

Mais, ainsi que Carl Woese et son collègue Nigel Goldenfeld le notent dans leur récent article sur "la prochaine révolution en biologie", le « point de départ », la caractéristique de la vie microbienne qui met le plus radicalement en question nos présupposés les plus vénérables sur l'évolution biologique et l'arbre de la vie, est la capacité qu'ont les microbes de réaliser massivement des transferts latéraux (ou horizontaux) de matériel génétique, une capacité que l'on n'a commencé à comprendre que récemment. On admet généralement désormais que, pour les microbes, la transmission de l'information génétique n'est pas limitée (comme c'est le cas pour la plupart des espèces dans le règne animal) au processus habituel d'hérédité (transmission verticale d'un ancêtre à un descendant) ; le matériel génétique peut également être transmis de manière intra-générationnelle, c'est-à-dire horizontalement. Compte tenu de ses implications extrêmes pour notre conception de l'évolution, je considère cette capacité non seulement comme un point de départ, mais aussi comme un aspect central de mon essai.

La dynamique primitive de l'évolution

Les mécanismes de base du transfert génétique horizontal (TGH), à savoir la transformation (le prélèvement d'ADN étranger et son incorporation dans le génome bactérien), la transduction (le transfert d'ADN d'une bactérie à une autre par un virus bactérien) et la conjugaison bactérienne (le transfert d'ADN d'une cellule à une autre

par contact direct), sont évidemment connus depuis longtemps. Ce qui est à la fois nouveau et surprenant, c'est de reconnaître que l'échange de matériel génétique entre deux ou plusieurs organismes de même génération, et même entre deux ou plusieurs membres de taxons² différents, ou plus simplement entre des organismes et leur environnement, est non seulement une caractéristique commune, mais encore une force fondamentale de l'évolution microbienne, même si elle est radicalement différente des forces qui dirigent l'évolution darwinienne. Plus remarquable, le TGH conduit à des généalogies qui ressemblent à une toile bien plus qu'à l'arbre métaphorique qui a tant dominé notre conception depuis Darwin. Tout aussi important, il permet également de comprendre deux caractéristiques essentielles de l'évolution auxquelles le cadre darwinien n'est jamais parvenu à s'adapter : la saltation³ et la symbiose. L'incorporation de grandes quantités de nouveau matériel génétique provenant d'autres organismes constitue en soi une forme de symbiose et, de ce fait, elle rend compte automatiquement d'au moins quelques-unes des discontinuités brutales survenues au début de l'histoire évolutive.

En effet, compte tenu de la fréquence du TGH, le début de l'histoire évolutive a un aspect extrêmement différent de ce qui s'est passé ensuite. L'évolution darwinienne, fondée sur la sélection naturelle de petites variations produites aléatoirement et transmises verticalement, prédomine encore sans doute en tant que mécanisme dominant de l'évolution pour les organismes multicellulaires. Or, pour que l'évolution darwinienne soit possible, il fallait que des entités capables de subir un tel processus (c'est-à-dire des entités qui soient suffisamment autonomes et qui puissent se reproduire avec suffisamment de fidélité pour rendre la sélection naturelle possible) soient déjà entrées en scène. Mais alors, comment sont-elles *elles-mêmes* apparues ?

² On désigne ainsi tout ensemble d'êtres vivants partageant des caractères qui les distinguent des autres organismes. Les taxons de base sont les espèces, qui se regroupent en taxons de niveau supérieur (le genre, la famille, l'ordre, etc., dans la classification traditionnelle).

³ Processus évolutif au cours duquel on saute brusquement d'une forme vivante à une autre, sensiblement différente, sans étapes intermédiaires.

Woese affirme que l'apparition de telles entités – des entités susceptibles d'évoluer par la suite selon le mécanisme habituel de la sélection naturelle pour donner les cellules modernes – a marqué une discontinuité radicale dans l'histoire de la vie, qu'il appelle le « seuil darwinien ». Avant ce moment il y a eu d'autres époques, marquées par d'autres discontinuités (ou bien, comme il aime les concevoir, des « transitions de phase »), durant lesquelles les êtres vivants ou protovivants devaient évoluer conformément à une logique totalement différente. L'apparition des acides nucléiques représenta l'une de ces discontinuités et conduisit à la période que Woese appelle l'« ère de la vie avec acides nucléiques ». A un certain moment de cette ère, il survint une autre discontinuité, provoquée cette fois par l'invention d'un mécanisme primitif de traduction, le « seuil du codage ». Comme l'écrit Woese :

« A un moment indéterminé de l'histoire, il s'est produit un saut que nous pouvons appeler le “seuil du codage”, où se développa la capacité de représenter symboliquement une séquence d'acide nucléique en termes de séquence (colinéaire) d'acides aminés; cette apparition allait engendrer un espace des phases évolutif entièrement nouveau et totalement unique. » ⁴

L'idée principale de Woese est le fait que la cellule moderne est apparue au cours de l'intervalle de temps entre ces deux seuils (le seuil du codage et le seuil darwinien), une période d'invention remarquablement prolifique et d'évolution rapide qui a été rendue possible par le partage du matériel génétique entre les entités pré- ou protocellulaires. Il déclare que ce monde de cellules primitives, dominé par les acides nucléiques et la vie microbienne :

« évoque une vaste mer, ou une immense étendue de gènes cosmopolites entrant et sortant des entités cellulaires (ou autres) en train d'évoluer. Étant donné les hauts niveaux de TGH, l'évolution à ce stade était fondamentalement collective, et non individuelle. La communauté des entités biologiques primitives en cours d'évolution dans leur ensemble, au

⁴ Carl R. Woese, “A New Biology for a New Century”, *Microbiology and Molecular Biology Reviews*, vol. 68, n° 2, 2004, p. 180.

même titre que le champ de gènes cosmopolites environnant, participe à une évolution collective en réseau. » ⁵

Ou bien, comme le résume Freeman Dyson :

« La vie était alors une communauté de cellules de différents types, partageant leur information génétique de telle sorte que des dispositifs chimiques astucieux et des processus catalytiques inventés par une créature pouvaient être hérités par toutes les autres. L'évolution était une affaire commune, l'ensemble de la communauté progressant en efficacité métabolique et reproductive à mesure que les gènes des cellules les plus efficaces étaient partagés. L'évolution pouvait être rapide, puisque les nouveaux dispositifs chimiques pouvaient être élaborés en même temps par des cellules de différents types travaillant en parallèle et réunis ensuite dans une même cellule par transfert génétique horizontal. » ⁶

Plus récemment, Woese a ajouté à ces descriptions la conclusion que, au cours de cette période ancienne, pré-darwinienne, l'évolution était non seulement rapide, mais aussi adaptative et « intrinsèquement lamarckienne » ⁷, caractérisée par un type de dynamique auquel notre expérience de l'évolution darwinienne ne nous avait pas du tout préparés.

« Tout ce qu'écrivait Carl Woese [...] doit être pris au sérieux », affirme Dyson, et je suis d'accord. Il nous a donné une vision radicale mais tout à fait convaincante sur la dynamique primitive de l'évolution. Mais si radicale que soit la vision de Woese, je voudrais aller plus loin. Je suggère que la reconnaissance du rôle du TGH dans l'origine de la cellule moderne fait beaucoup plus que perturber les conceptions conventionnelles sur l'évolution. En particulier, lorsqu'on la met en rapport avec les travaux récents sur l'auto-assemblage chimique, elle offre également l'occasion (du moins je le prétends) de sortir de ce qui pourrait bien être l'impasse la plus ancienne et la plus difficile de la science biologique, à savoir la frontière entre le monde vivant et le monde non vivant. Et là encore, les bactéries occupent une position privilégiée,

⁵ *Ibidem*, p. 182.

⁶ Freeman J. Dyson, "Our Biotech Future", *The New York Review of Books*, vol. 54, n°12, 19 juin 2007.

⁷ Nigel Goldenfeld et Carl R. Woese, "Biology's Next Revolution", *Nature*, vol. 445, 2007, p. 369.

compte tenu de leur situation au bord de la transition entre le vivant et le non-vivant. Le TGH ne modifie pas ce positionnement conceptuel, mais il lui confère une nouvelle importance, il offre une nouvelle manière d'expliquer la transition entre le vivant et le non-vivant, et donc une nouvelle légitimité aux questions sur l'origine de la vie.

Au fond, *qu'est-ce que la vie*? Quand et comment a-t-elle commencé? Certains pourraient dire que la vie a commencé avec le franchissement du seuil darwinien; Woese, semble-t-il, situerait plutôt cette division à un stade plus précoce, avec l'apparition des acides nucléiques (il appelle cette forme de vie «la vie avec acides nucléiques»). D'autres encore pourraient repousser l'origine de la vie encore plus loin, lors de l'apparition d'assemblages auto-catalytiques capables de se perpétuer. Qui a raison? En fait, on pourrait se demander *s'il y a* une bonne réponse. J'ai affirmé qu'il n'y avait pas de bonne réponse, que l'endroit où l'on trace la frontière entre le vivant et le non-vivant est une convention humaine et non naturelle⁸. Mais le point le plus important, du moins dans ma perspective, est de reconnaître que l'émergence de la vie telle que nous la connaissons maintenant a impliqué non pas une, mais toute une série de discontinuités. Le grand apport de Woese à cette discussion est d'avoir rendu intelligible la dernière de ces discontinuités (le seuil darwinien), et de l'avoir fait de telle sorte que l'on puisse également rendre compte de celles qui sont venues avant.

Plus spécifiquement, la vision qu'a Woese de l'évolution pré-darwinienne enterre l'idée que la sélection naturelle, au sens darwinien, est le seul mécanisme par lequel les entités vivantes (ou proto-vivantes) puissent évoluer, et évoluent en effet. Les cellules qui rendent possible l'évolution darwinienne ne sont pas apparues *de novo*; elles sont elles-mêmes un produit de l'évolution, bien que ce soit par le biais d'une dynamique évolutive différente. En fait, le scénario de Woese ouvre la perspective d'une série de régimes évolutifs différents, chacun ayant sa dynamique propre. Il ouvre également la perspective d'un mode de

⁸ Evelyn Fox Keller, "What is Wrong With the Question, 'What is Life?'" , in *Concepts of Life*, éd. par Paola Marrati et al., Stanford University Press, à paraître en 2008.

sélection plus général que celui que Darwin nous offrait, un mode de sélection analogue à ce que Herbert Simon a désigné depuis longtemps comme « la survie du plus apte, c'est-à-dire du plus stable »⁹. Dans l'évolution darwinienne et, en fait, dans toutes les formes de vie modernes, l'aptitude reproductive est la principale garantie de la stabilité, mais cela n'a pas nécessairement été le cas dans les formes de vie (ou de proto-vie) plus anciennes. Au cours de la période de prédominance du TGH, les communautés d'entités pouvaient manifester de la stabilité non seulement par la réplication de séquences particulières d'acides nucléiques, mais aussi grâce à la dynamique du transfert génétique et aux configurations stables qu'une telle dynamique peut produire. Dans les régimes évolutifs qui ont précédé la transition du codage (et donc la possibilité des gènes), d'autres types encore de mécanismes auraient été requis pour produire de nouveaux types d'entités stables. Mais quel que soit le mécanisme, ce sont les entités les plus stables qui auraient été sélectionnées, et c'est pour la machinerie garantissant cette stabilité qu'elles l'auraient été.

La chimie supramoléculaire

Le « seuil darwinien » n'est évidemment pas la seule discontinuité évolutive dont il faille rendre compte, et d'ailleurs ce n'est pas la seule sur laquelle Woese ait concentré ses efforts. Woese est également connu pour avoir très tôt contribué à notre compréhension de la rupture dans la dynamique évolutive qui a précédé et a amené la possibilité d'un matériel génétique, et qui, en conséquence, a rendu le TGH possible. Je fais bien sûr référence à l'émergence d'un mécanisme de traduction et, plus spécifiquement, de l'appareil biochimique qui nous donne un code génétique (pratiquement) universel. Mais pour comprendre comment *ce mécanisme-là* aurait pu évoluer, pour comprendre le caractère de la dynamique évolutive au cours de la période qui a conduit au « seuil du codage » (et, de là, à l'ère du TGH), il nous faut regarder ailleurs. Et l'endroit où il faut évidemment regarder pour acquérir cette

⁹ Herbert A. Simon, "The Architecture of Complexity", in *The Sciences of the Artificial*, Cambridge, MIT Press, 1969, p. 191.

compréhension est une science nouvelle, la « chimie supramoléculaire », c'est-à-dire la chimie des auto-assemblages moléculaires.

Il y a trente ans, Jean-Marie Lehn a forgé le terme (et le concept) de *chimie supramoléculaire* pour désigner le champ de recherche en plein essor sur la dynamique de la liaison non covalente entre molécules et les structures complexes auxquelles ce type de liaison peut conduire ; il y a vingt ans, il a reçu le prix Nobel pour ses propres contributions à ce travail. Au cours des années qui ont suivi, le domaine de la chimie supramoléculaire a explosé et s'est étendu au-delà de la chimie, dans l'ingénierie et les nano-technologies, où les chercheurs ont élaboré des moyens de guider l'auto-assemblage spontané mais contrôlé de molécules en des architectures supramoléculaires, en remaniant la structure des récepteurs moléculaires et des substrats avec lesquels ces récepteurs interagissent. Ce processus est parfois désigné comme l'« auto-organisation dirigée » (*self-organization by design*) et a suscité un débordement d'activité sur l'auto-assemblage programmé, dans lequel les éléments constitutifs peuvent être soit des molécules (organiques ou inorganiques), soit des éléments construits artificiellement dont la taille peut aller jusqu'aux dimensions moléculaires, et dans lequel les produits finaux peuvent comprendre non seulement des nouveaux matériaux comme les hydrogels, les fullerènes¹⁰, les films fins de polymères, mais aussi des polymères auto-cicatrisants, des détecteurs ou des moteurs moléculaires, et même des composants de circuits électroniques.

Ce qui est peut-être le plus important, en particulier pour la science biologique, c'est que, en raison de la labilité (et de la réversibilité) des interactions non covalentes, de telles structures sont fondamentalement dynamiques. Au cours de la formation progressive de toutes ces structures plus complexes, les éléments moléculaires se combinent et se recombinent, s'associent et se dissocient, et ce processus permet une investigation efficace du domaine des interactions possibles et la

¹⁰ Les fullerènes sont des molécules carbonées complexes dont la structure évoque par exemple des dômes géodésiques, des sphères ou des tubes. Leur capacité de contenir et de transporter certaines substances en fait des outils de choix dans les nanotechnologies.

sélection, parmi les combinaisons disponibles, de celles qui ont une énergie et une structure optimales (c'est-à-dire les plus stables) d'un point de vue thermodynamique. Lehn distingue ce processus de l'« auto-organisation dirigée » et le désigne comme l'« auto-organisation par sélection » ; plus important, il considère que c'est grâce à lui que ces types de systèmes sont capables « d'adapter leur architecture ainsi que leur composition en réaction à des facteurs [internes ou externes] » ¹¹. En outre, les principes de la chimie supramoléculaire ont été désormais étendus aux domaines de la chimie moléculaire, dans lesquels les entités moléculaires en question sont formées par liaisons covalentes réversibles. Dans des cas de ce genre, le même processus d'associations et de dissociations répétées peut être mis en jeu pour modifier la construction des assemblages moléculaires eux-mêmes, simplement en changeant le contexte de leur formation.

Le vivant et le non-vivant

L'auto-organisation par sélection crée ainsi un domaine entièrement nouveau de possibilités, au niveau à la fois supramoléculaire et moléculaire, et l'on a introduit l'expression de « chimie dynamique constitutionnelle » pour désigner ce nouveau domaine. Ce qui est d'importance capitale ici, c'est le déplacement du centre d'intérêt de l'étude de formes relativement statiques d'auto-assemblage ayant lieu près de l'équilibre vers le domaine de l'auto-assemblage dynamique de systèmes éloignés de l'équilibre.

Pour prendre un seul exemple, le fait, démontré récemment par Lehn, que des moteurs moléculaires unidirectionnels capables de convertir l'énergie lumineuse en mouvement mécanique puissent être synthétisés à partir de composés ordinaires (de type imine) repose sur un flux d'énergie photoélectrique qui maintient nécessairement le système dans

¹¹ Jean-Marie Lehn, "From Supramolecular Chemistry Towards Constitutional Dynamic Chemistry and Adaptive Chemistry", *Chemical Society Reviews*, vol. 36, 2007, p. 153.

un état éloigné de l'équilibre ¹². Cette extension vers les états de non-équilibre a deux conséquences notables : d'abord, il devient possible désormais d'envisager un rapprochement décisif (au niveau de la théorie et des observations) entre l'auto-assemblage structural et les exemples d'auto-organisation dans des systèmes thermodynamiques ouverts que l'on désigne parfois comme des « structures dissipatives » et, en outre, il devient possible de concevoir des processus purement chimiques en des termes évolutionnistes (bien qu'encore pré-darwiniens). Il est vrai que la notion d'évolution chimique existe depuis longtemps, mais maintenant, avec les travaux de Lehn et de ses collègues, cette notion commence à s'imposer véritablement. De fait, à partir du moment où la dynamique par laquelle des structures de relativement grande stabilité thermodynamique sont sélectionnées automatiquement vient s'ajouter au processus d'auto-organisation, il devient de plus en plus difficile de faire la différence entre les processus biologiques et les processus purement chimiques, et donc de plus en plus tentant d'importer en chimie le langage de la biologie. Il n'est par conséquent pas étonnant que Lehn ait employé les termes d'« adaptation » et d'« évolution » pour désigner les processus qu'il étudiait.

Par exemple, lorsqu'il cherche à distinguer l'« auto-organisation par sélection » de l'« auto-organisation dirigée », il écrit que la première « agit sur la diversité dynamique constitutionnelle en réaction aux facteurs internes ou externes pour réaliser une adaptation à la manière darwinienne » ¹³. Le lien avec les processus biologiques est encore plus explicite dans la description qu'il donne du fonctionnement auto-optimisé de l'auto-organisation par sélection, où il estime qu'« un tel comportement pourrait avoir une portée plus large, à savoir pour l'évolution chimique prébiotique ». Cette importance particulière pour l'évolution prébiotique, explique Lehn, réside dans le fait que « l'entité sélectionnée [est] celle qui donne l'assemblage supramoléculaire organisé le plus stable dans une sorte de darwinisme prébiotique dirigé

¹² Jean-Marie Lehn, "Conjecture: Imines as Unidirectional Photodriven Molecular Motors - Motional and Constitutional Dynamic Devices", *Chemistry - A European Journal*, vol. 12, n°23, 2006, pp. 5910-5915.

¹³ J.-M. Lehn, "From Supramolecular Chemistry...", *art. cité*, p. 159.

par l'auto-organisation. L'organisation supramoléculaire dirige la sélection des composants qui donne le constituant "le plus adapté" »¹⁴.

Nous avons ici une hypothèse qui fait concurrence aux propositions de Woese, à la fois par son audace et par la puissance et l'ampleur de ses implications, et si on l'intègre aux arguments de Woese eux-mêmes, elle annonce rien de moins qu'un comblement du fossé conceptuel entre le vivant et le non-vivant. En écho à Herbert Simon, Lehn propose en effet une conception généralisée du « darwinisme » qui est fondée sur la sélection des configurations les plus stables, et qui promet de transcender les différences qui semblaient radicales entre les types de dynamique évolutive caractéristiques des différentes époques qui ont précédé l'apparition des organismes vivants. Si la même dynamique peut être invoquée pour expliquer l'auto-assemblage spontané de macromolécules biologiques, la même formulation pourrait alors être employée pour décrire l'évolution de molécules encore plus complexes, interagissant de manière encore plus complexe. On pourrait dire qu'elle persiste à travers les multiples discontinuités qui marquent les différents stades de l'évolution, elle mène jusqu'à la « transition du codage » et peut-être même au-delà et, chose étonnante, elle conduit tout droit à l'entrée du monde microbien de Woese. En particulier, cette conception généralisée du darwinisme s'accorde presque naturellement avec la dynamique évolutive que Woese a proposée pour nous conduire au « seuil darwinien ». Et finalement, à partir du moment où l'on accepte ce remaniement conceptuel consistant à faire de la reproduction un mécanisme parmi d'autres (bien qu'extrêmement efficace) permettant d'assurer la stabilité, l'extension de ce mécanisme à l'évolution darwinienne conventionnelle, post-biotique, doit s'ensuivre avec une égale facilité.

*

Voici un siècle, Stéphane Leduc cherchait à expliquer l'origine de la vie par la synthèse de « croissances osmotiques », des structures cristallines qui apparaissent spontanément dans des mélanges de composés inorganiques et qui présentent des ressemblances frappantes

¹⁴ *Ibidem*, p. 155.

(à la fois dans l'apparence et même, parfois, dans le comportement) avec des cellules en division, des plantes, des champignons et un grand nombre d'autres entités qui peuplent le monde vivant actuel. Leduc prétendait que ces structures offraient une preuve irréfutable en faveur des bases physico-chimiques de la vie et de son apparition spontanée à partir de structures chimiques simples. À l'époque, la vraisemblance de ses « croissances » fut estimée convaincante par de nombreux lecteurs, même si certains rejetaient leur prétention à un intérêt biologique en raison du fait qu'elles ne pouvaient pas se reproduire.

Plus tard, leur valeur scientifique fut contestée et elles furent considérées comme guère plus, selon la formule d'Oparine, qu'« une illusion extravagante donnée par l'apparence externe »¹⁵. Et pourtant. Les productions de Leduc étaient certainement étonnantes, mais elles n'étaient manifestement pas vivantes, et ses tentatives pour forger une « biologie synthétique » étaient évidemment prématurées. Cependant, il existe une certaine continuité entre ses travaux et ceux des chimistes supramoléculaires d'aujourd'hui, de même qu'il y a un lien perceptible avec la biologie synthétique actuelle, et avec du recul on pourrait dire que sa foi en la puissance de l'auto-assemblage moléculaire et l'auto-organisation a été prophétique.

Aujourd'hui, la biologie synthétique, établie sur les avancées considérables qui ont été accomplies dans notre compréhension de la dynamique de l'auto-assemblage moléculaire et de la biochimie de la réplication, devient rapidement une industrie prospère. Elle progresse principalement sur deux fronts, l'un qui a été tracé par les tentatives de Lehn et de ses collègues, l'autre par celles de Woese. Et de même que les efforts de Lehn et de Woese, les deux fronts de la biologie synthétique semblent être en train de converger. Pour certains chercheurs, le point important est l'élaboration d'assemblages moléculaires dotés des propriétés biologiques essentielles d'auto-réplication et d'évolution; pour d'autres, le point de départ, ce sont des bactéries ou des modules simples d'acides nucléiques déjà capables d'auto-réplication. La différence capitale entre nos propres tentatives de synthèse et les

¹⁵ Voir Evelyn Fox Keller, *Expliquer la vie* [2002], Paris, Gallimard, 2005.

expériences de notre passé évolutif est le fait que, cette fois, la volonté et la capacité d'invention de l'*Homo sapiens* sont devenues des composantes essentielles du processus. Selon Dyson, l'époque actuelle marque la fin de ce qu'il appelle l'«intermède darwinien», c'est-à-dire « un intermède entre deux périodes de transfert génétique horizontal ». Il prévoit un avenir biotechnologique doré, fondé sur la remise en vigueur par nous de l'« ancienne pratique prédarwinienne du transfert génétique horizontal, le déplacement facile de gènes de microbes aux plantes et aux animaux, l'effacement des frontières entre les espèces »¹⁶.

Je suis moi aussi enthousiaste, même si je ne partage pas la confiance de Dyson. Mais, avant tout, je reconnais dans son pronostic certaines vérités qui ne peuvent être niées ni ignorées. Nous entrons effectivement dans un nouveau futur biotechnologique, qui à la fois promet et menace de changer le sens de la vie. Je disais précédemment que les bactéries étaient à nouveau le centre d'attention de la biologie, et je crois qu'elles vont continuer de l'être (au moins un certain temps). Mais dans l'avenir que Dyson imagine, leur importance tiendra probablement moins à ce qu'elles pourront nous enseigner sur la nature de la vie et plus aux moyens grâce auxquels nous pourrons les mettre à notre service, en employant les mécanismes que nous avons appris d'elles, en les manipulant et en les utilisant comme des outils avec lesquels nous fabriquerons non seulement de nouvelles formes de vie, mais aussi de nouveaux modes de vie.

Evelyn Fox Keller.

Traduit de l'anglais par Stéphane Schmitt.

Evelyn Fox Keller est professeur émérite
d'histoire et de philosophie des sciences
au Massachusetts Institute of Technology (MIT).

Elle est notamment l'auteur de *Le Siècle du gène*
et de *Expliquer la vie* (Paris, Gallimard, 2003 et 2005).

¹⁶ F. J. Dyson, "Our Biotech Future", art. cité.

Jean-Marie Lehn

Vers la matière complexe

*Chimie supramoléculaire
et auto-organisation*



Tandis que le vent du temps gonfle les voiles de l'espace, le déploiement de l'univers nourrit l'évolution de la matière sous la pression de l'information. De la matière divisée à la matière condensée puis organisée, vivante et pensante, le chemin mène à un accroissement de complexité par auto-organisation.

Ainsi émerge la question primordiale posée à la science et en particulier à la chimie, la science de la structure et de la transformation de la matière : comment la matière devient-elle complexe ? Quels sont les processus et les étapes qui conduisent de la particule élémentaire à l'organisme pensant, l'entité (présente !) de plus haute complexité ?

Deux autres questions y sont reliées : l'une ontogénétique - comment cela s'est-il fait, comment la matière est-elle devenue complexe dans l'histoire de l'Univers, menant jusqu'à l'évolution du monde biologique ? – et l'autre épigénétique – quelle autre forme, quelles formes plus élevées de la matière complexe sont en attente, restent à être créées, par-delà même la matière pensante, telle que nous la connaissons ?

À grande échelle, l'auto-organisation cosmique résulte d'une structuration de l'Univers par les forces gravitationnelles opérant sur des inhomogénéités initiales en densité et en vitesse d'expansion à une époque très précoce, juste après le big-bang.

L'auto-organisation de la matière, non vivante puis vivante, trouve, elle, son origine dans la structuration de la matière atomique et moléculaire par les forces électromagnétiques opérant sur des combinaisons aléatoires des éléments disponibles dans l'Univers et produisant des architectures fonctionnelles de plus en plus complexes.

L'auto-organisation est la pulsion primordiale qui a conduit à l'évolution du monde biologique à partir de la matière inanimée, qui elle-même s'est progressivement auto-organisée aux époques prébiotiques suivant une évolution chimique pré-darwinienne.

L'évolution chimique pré-biotique a conduit, sous l'action des forces intra- et intermoléculaires, à une complexification progressive de la matière mettant en œuvre une sélection sur la diversité structurale sous la pression de l'information et en réponse aux interactions avec l'environnement.

La chimie fournit des moyens d'interroger le passé, d'explorer le présent et de jeter des ponts vers le futur.

La *chimie moléculaire* a créé un vaste ensemble de molécules et de matériaux de plus en plus sophistiqués, et a développé un arsenal extrêmement puissant de procédés pour les construire à partir d'atomes liés par des liaisons dites covalentes. De la synthèse de l'urée en 1828 à celle de la vitamine B₁₂, au début de la décennie 1970, jusqu'aux édifices encore plus complexes et aux procédés encore plus efficaces et sélectifs réalisés depuis, elle a affirmé son pouvoir sur la structure et la transformation de la matière moléculaire.

Par-delà la molécule s'étend le domaine de la *chimie supramoléculaire*, dont l'objectif est d'acquérir la maîtrise de la liaison intermoléculaire. Elle s'intéresse au degré de complexité supérieur, aux entités supramoléculaires et aux systèmes polymoléculaires organisés, maintenus par diverses interactions non covalentes.

La chimie supramoléculaire et le paradigme de l'information

Un des axes majeurs de développement de la chimie réside dans la perception de plus en plus aiguë, l'analyse de plus en plus profonde et l'application de plus en plus délibérée du paradigme de l'information dans l'élaboration et la transformation de la matière, traçant ainsi la voie d'une matière juste condensée vers une matière de plus en plus hautement organisée, vers des systèmes de complexité croissante.

En chimie, comme dans d'autres domaines, le langage de l'information élargit et étend celui de la constitution, de la structure et de la transformation au fur et à mesure que le champ se développe vers des architectures et des comportements de plus en plus complexes. Il influencera profondément notre perception de la chimie, la manière dont nous la pensons et la façon dont nous la pratiquons.

La chimie supramoléculaire a tracé la voie conduisant à appréhender la chimie aussi comme une science de l'information par la mise en œuvre du concept de l'information moléculaire afin d'acquérir progressivement le contrôle sur les propriétés spatiales (structurales) et temporelles (dynamiques) de la matière et sur sa complexification par auto-organisation.

Elle a débuté et s'est développée comme chimie des entités produites par des interactions intermoléculaires non covalentes entre composants moléculaires. Par manipulation contrôlée de ces interactions, elle est progressivement devenue chimie de l'information moléculaire. Le stockage de cette information a lieu au niveau moléculaire, dans les caractéristiques structurales des composants, alors que son transfert et son traitement se font au niveau supramoléculaire, par des algorithmes interactionnels opérant sur la base de processus de reconnaissance moléculaire qui reposent sur des motifs interactionnels bien définis. Ces études ont conduit à l'élaboration de molécules réceptrices pré-organisées, construites sur mesure, capables de lier des substrats spécifiques avec grande efficacité et sélectivité et d'effectuer sur eux diverses fonctions.

On peut schématiquement distinguer trois phases, se recouvrant partiellement, dans le développement de la chimie supramoléculaire, chacune explorant un thème principal.

— La première concerne la reconnaissance moléculaire et ses corollaires, réactivité, catalyse et transport supramoléculaires. Elle repose sur la pré-organisation des espèces moléculaires mises en jeu et met en œuvre le stockage et le traitement de l'information moléculaire.

— La deuxième s'étend à l'auto-assemblage et à l'auto-organisation, aux «auto-processus» en général et met en œuvre programmation et systèmes programmés.

— La troisième phase, qui a émergé récemment, introduit en chimie adaptation et évolution; elle étend les processus d'auto-organisation vers la sélection des espèces qui y participent et met en œuvre diversité chimique et dynamique « informée ».

Auto-organisation et systèmes programmés

De la pré-organisation, consistant en la conception la plus exacte possible des partenaires, récepteur et substrat, d'un processus de reconnaissance, la chimie supramoléculaire a ainsi évolué vers l'élaboration de processus d'auto-organisation afin de révéler et mettre en œuvre les mécanismes par lesquels des espèces chimiques complexes peuvent se construire d'elles-mêmes, de façon spontanée mais néanmoins contrôlée. Ces systèmes en auto-organisation, capables de créer des architectures supramoléculaires bien définies, organisées et fonctionnelles, se comportent donc comme des systèmes programmés.

La programmation chimique requiert l'incorporation dans les composants moléculaires d'instructions adéquates pour la formation spontanée mais dirigée d'une entité supramoléculaire bien définie. Le programme est moléculaire, l'information étant portée par la structure moléculaire covalente : son opération est supramoléculaire, mettant en œuvre des algorithmes de reconnaissance fondés sur des motifs spécifiques d'interactions non covalentes. Comprendre, induire et

diriger de tels autoprocesso est la clé de la mise en évidence des processus présidant à l'émergence progressive de la matière complexe.

Un exemple biologique d'auto-organisation d'un système programmé, à la frontière entre le non-vivant et le vivant, est celui de l'édification d'un virus, tel que le virus de la mosaïque du tabac, à partir de ses composants, l'acide nucléique génomique et les molécules de protéine de l'enveloppe.

On peut considérer qu'un tel processus comporte trois étapes :

- 1) association des composants par reconnaissance moléculaire ;
- 2) croissance par liaison de nouveaux composants ;
- 3) terminaison par un signal stop, quand l'entité finale est atteinte.

Il peut être plus ou moins robuste, c'est-à- dire être plus ou moins capable de résister aux perturbations provenant soit d'effets secondaires, interférant avec le code principal, soit de facteurs physiques ou chimiques externes. Une autosélection a lieu lorsque les instructions sont suffisamment fortes pour continuer à opérer et conduire à l'entité (aux entités) finale(s), même en présence d'un mélange complexe d'espèces.

Ce type de phénomène entraîne un changement de paradigme de la notion de « composés chimiquement purs » en celle de « mélanges instruits », de l'unicité « informée ».

Plutôt que de s'attacher à l'obtention de composés purs, on cherche à élaborer des composants « instruits » qui, bien qu'en mélange, conduisent néanmoins aux diverses entités finales en vue desquelles ils ont été programmés. C'est notamment ce qui se passe lors de l'organisation d'architectures supramoléculaires complexes et de l'exécution de fonctions hautement intégrées qui ont lieu côte à côte dans l'assemblage et le fonctionnement de la machinerie de la cellule vivante.

Le stade suivant consiste en la mise au point de processus d'auto-organisation séquentiels et hiérarchisés, comprenant des étapes successives dont chacune prépare la suivante en un déroulement

conditionnel et qui mènent à des niveaux de complexité croissante avec émergence de propriétés nouvelles à chaque étape.

Auto-organisation multiple

Dans sa forme la plus simple, la génération d'une superstructure par auto-organisation résulte de l'opération d'un code unique d'assemblage. Une étape ultérieure consiste en la conception de systèmes opérant en mode multiple par la mise en œuvre de plusieurs codes au sein d'un même programme. Par ailleurs, le traitement d'une même information moléculaire par des algorithmes d'interaction différents conduit aussi à la formation d'objets supramoléculaires différents, faisant ainsi correspondre plusieurs produits à un même code/programme suivant le mode de traitement.

Une telle capacité de traitement multiple de l'information moléculaire d'une seule série d'instructions représente un stade plus avancé dans la conception de systèmes chimiques programmés de complexité croissante, capables de produire une variété d'architectures. Elle permet ainsi la génération de diversité par la coexistence ou l'accessibilité potentielle (diversité virtuelle) d'un ensemble de produits. Elle ouvre la voie à l'introduction de la notion de sélection dans les processus d'auto-organisation.

Le développement de processus d'auto-organisation, en particulier multiple, permet d'envisager l'édification spontanée, mais contrôlée, de dispositifs supramoléculaires nanométriques bien définis, organisés et fonctionnels. Ainsi, dans le futur, l'auto-organisation pourra devenir un acteur majeur en nanoscience et nanotechnologie, une puissante alternative à la nanofabrication et à la nanomanipulation, rendant possible le passage de la fabrication à l'auto-fabrication.

Auto-organisation avec sélection

Les interactions non covalentes étant comparativement faibles, les entités supramoléculaires sont labiles, pouvant se dissocier en leurs composants moléculaires, se réassembler, incorporer des composants

nouveaux ou en expulser certains, échanger leurs composants ou les réarranger au sein de la superstructure. Ainsi, les espèces supramoléculaires sont intrinsèquement dynamiques dans leur constitution et présentent la capacité de la modifier de façon continue. La chimie supramoléculaire est donc par nature une *chimie dynamique constitutionnelle* (CDC), reposant sur la plasticité de la constitution de ses objets.

Élargissant les perspectives, on peut envisager de transférer une telle dynamique aussi au niveau moléculaire lui-même. Cela devient possible par introduction dans l'objet moléculaire de liaisons covalentes susceptibles de se former et de se défaire par des réactions réversibles.

Ainsi, la CDC peut être moléculaire autant que supramoléculaire, reposant sur la production de diversité constitutionnelle dynamique aux deux niveaux et donnant accès à des ensembles de constituants, réels ou virtuels, comprenant toutes les combinaisons possibles de tous les composants en présence. Il devient de ce fait possible d'opérer une sélection de composants donnés permettant l'expression d'un constituant spécifique, au sein de l'ensemble des entités ayant toutes les constitutions possibles, sous la pression de facteurs internes ou externes présents dans l'environnement.

La CDC introduit un changement fondamental de paradigme et ouvre des perspectives nouvelles par rapport à la chimie «statique», celle des objets moléculaires dont la constitution est stable, car reposant sur des liaisons covalentes non réversibles. Elle tire avantage de la diversité dynamique (moléculaire ou supramoléculaire) pour permettre une variation de la constitution et met en œuvre la sélection pour réaliser l'adaptation de manière « darwinienne ».

Alors que la pré-organisation repose sur une conception *a priori* de l'objet chimique, l'auto-organisation introduit en plus la possibilité pour le système de se construire par sélection. Ainsi, en faisant appel à la puissance de la sélection pour introduire adaptation et évolution sur la scène moléculaire, la CDC ouvre une ère « darwinienne » en chimie, où s'exprime l'espèce la mieux adaptée.

On peut envisager la mise en œuvre de la cdc en particulier dans la recherche de substances biologiquement actives par une chimie combinatoire dynamique, la formation de nano- structures dynamiques et le développement de matériaux dynamiques.

Vers une chimie adaptative et évolutive

La combinaison des caractéristiques de la chimie supramoléculaire – information et programmation, dynamique et réversibilité, constitution et diversité – mène vers l'émergence d'une chimie adaptative et évolutive. Celle-ci est, par essence, de nature supramoléculaire, puisque déterminée par les interactions avec une entité externe.

Une chimie adaptative implique sélection et croissance sous réversibilité temporelle. L'auto-organisation rend possible l'ajustement, l'ajustabilité conduit à l'adaptabilité (par réorganisation sous interaction avec des effecteurs présents dans l'environnement), l'adaptation devient évolution lorsque les caractéristiques acquises sont conservées et transmises.

Le seuil darwinien se place entre adaptation et évolution, le traitement et la transmission de l'information moléculaire passant d'horizontaux à verticaux. L'adaptation est réalisée par optimisation sous la pression de la fonction en effectuant une sélection à partir d'un ensemble d'espèces en interconnexion dynamique. Les systèmes chimiques évolutifs impliquent des processus dynamiques multiples avec des étapes de sélection/ acquisition/ fixation et subissent un changement progressif de structure interne sous la pression de facteurs environnementaux.

Mais brutal est le monde de la sélection où seul le mieux adapté survit ! Et c'est finalement à la pensée et au dessein qu'il appartient de s'ouvrir sur une ère post-darwinienne en recrutant les forces de l'information pour passer outre au *diktat* de la sélection !

Par-delà les systèmes programmés et dans la ligne d'une chimie évolutive, l'étape suivante en complexité consiste dans l'élaboration de systèmes chimiques capables d'« apprendre », des systèmes qui ne sont pas simplement instruits, mais qui peuvent être éduqués.

L'incorporation de la flèche du temps, la non-réversibilité temporelle, ouvre sur l'auto-organisation dans des systèmes hors équilibre, dissipatifs, par des processus irréversibles, comme c'est le cas dans les organismes vivants. Elle implique le passage de systèmes fermés aux systèmes ouverts et couplés, connectés spatialement et temporellement entre eux et à leur environnement. Elle représente un but et un défi majeurs pour le futur.

Vers une science de la matière complexe

Dans le long terme, le développement des sciences chimiques tend vers une chimie des systèmes complexes, embrassant les perspectives les plus larges de la matière divisée à la matière condensée, vers la matière organisée et adaptative, vers la matière vivante et pensante, gravissant l'échelle de la complexité.

La complexité implique et résulte de la multiplicité des composants, de l'interaction entre eux et de l'intégration de l'ensemble, comprenant corrélation, couplage et rétroaction.

Les espèces et les propriétés définissant un certain niveau de complexité résultent et peuvent être expliquées en termes d'espèces appartenant au niveau inférieur et de leurs interactions, c'est-à-dire entités supramoléculaires en termes de molécules, cellules en termes d'entités supramoléculaires, tissus en termes de cellules, organes en termes de tissus, etc., jusqu'au comportement des sociétés et des écosystèmes suivant une hiérarchie définissant l'architecture de la complexité. A chaque niveau de complexité croissante se manifeste l'*émergence* de nouvelles propriétés, propriétés qui sont déductibles de celles des niveaux inférieurs mais ne leur sont pas réductibles.

Ainsi, la chimie dans son sens le plus large ouvre les voies et donne les moyens de démêler les fils vers la complexification progressive de la matière par auto-organisation. Le but est de découvrir, comprendre et mettre en œuvre étape par étape les règles qui gouvernent l'évolution de la matière de l'inanimé à l'animé et, par-delà, d'acquérir la capacité de créer de nouvelles formes de la matière complexe.

Les perspectives ouvertes s'élargissent au fur et à mesure des progrès réalisés et constitueront pour longtemps des horizons pour le futur !

Jean-Marie Lehn

Jean-Marie Lehn est titulaire de la chaire
de chimie des interactions moléculaires
au Collège de France.
Il a reçu le prix Nobel de chimie en 1987.

Le Débat a publié un article
tiré de sa leçon inaugurale
« Chimie et création. Science, art et industrie »
(n°18, janvier 1982).

Sommaire

Vers une nouvelle biologie ?	1
Jerry A. Fodor	
Pourquoi les porcs n'ont pas d'ailes	3
Freeman J. Dyson	
L'avenir des biotechnologies	20
Nigel Goldenfeld, Carl R. Woese	
La prochaine révolution en biologie	52
Evelyn Fox Keller	
L'unification de la biologie et de la chimie	57
Jean-Marie Lehn	
Vers la matière complexe	70

Dossier "Vers une nouvelle biologie ?"
publié dans la revue *Le débat* n°152,
novembre-décembre 2008.

La science est précieuse et admirable pour sa capacité à établir un certain type de vérité au-delà de tout doute raisonnable, pour ses méthodologies précises et son respect des preuves. Il est donc déconcertant de voir un éminent scientifique tel que Freeman Dyson utiliser son prestige et celui de la science comme une chaire pour prédire l'avènement d'une nouvelle panacée technologique.

Prix Libre